



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA
OSMOSE INVERSA USANDO ENERGIA NÃO-CONVENCIONAL,
SEM A UTILIZAÇÃO DE ACUMULADORES.

ARLEIDE RICARTE DE OLIVEIRA

Campina Grande – PB
Agosto de 2007



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Processos

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE
INVERSA USANDO ENERGIA NÃO-CONVENCIONAL, SEM A UTILIZAÇÃO
DE ACUMULADORES**

Tese de Doutorado apresentada à
Coordenação do curso de Engenharia de
Processos da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia de
Processos.

Autor: Arleide Ricarte de Oliveira
Engenharia Química (UAEQ/CCT/UFCG, 2000)
Mestre em Engenharia Química (UAEQ/CCT/UFCG, 2002)

Orientadores: Prof. Dr. Kepler Borges França
Prof. Dr. Hervé Michel Laborde

Campina Grande - PB
Agosto de 2007

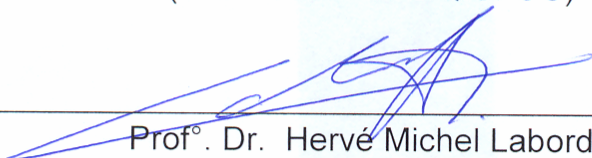
**DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE
INVERSA USANDO ENERGIA NÃO-CONVENCIONAL**

BANCA EXAMINADORA

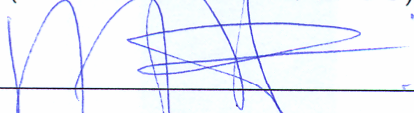
Tese de Doutorado aprovada em 31 de Agosto de 2007, pela banca examinadora constituída pelos professores:



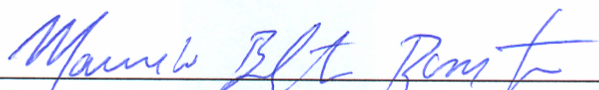
Profº. Dr. Kepler Borges França
(Orientador - UAEQ/UFCG)



Profº. Dr. Hervé Michel Laborde
(Orientador - UAEQ/UFCG)



Profº. Dr. Gilmar Trindade de Araújo
Examinador externo



Profº. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Correa
(Examinador externo - UAEE/UFCG)



Profº. Dr. José Jailson Nicácio Alves
(Examinador externo - UAEQ/UFPB)



Profº. Dr. Hélio Lucena Lira
(Examinador interno - UAEMA/UFPB)

Campina Grande – Paraíba
Agosto de 2007

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais,
irmãos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus por me dar força e coragem para vencer mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, Arlindo Ricarte Primo e Terezinha Ricarte de Oliveira, aos meus irmãos Arlindo Júnior e Arleusson, pela paciência, incentivo, compreensão e apoio.

Aos meus orientadores, professor Dr. Kepler Borges França e Dr. Hervé Michel Laborde, pela orientação e valiosas contribuições, sem as quais este trabalho não seria realizado.

Aos companheiros de trabalho Francisco Sérgio Gusmão, Leonildo e Jorge pela colaboração, paciência, sugestões e discussões deste trabalho.

A todos que fazem o Laboratório de Referência em Dessalinização.

A todos os amigos pelo companheirismo e incentivo, em especial, Shefora Elisângela Henrique de Sousa, Ana Paula Trindade Rocha e Meiry Gláucia Freire Rodrigues.

A Coordenação do Doutorado em Engenharia de Processos.

A CAPES pelo suporte financeiro através da Bolsa do Programa de Pós-Graduação.

RESUMO

A falta de água potável em algumas localidades do mundo, mais precisamente no semi-árido, é um problema de caráter secular, agravado pela poluição, distribuição irregular e existência de águas subterrâneas de utilização bastante limitada por causa dos altos índices de salinidade. Por outro lado, essas regiões possuem um grande potencial de irradiação solar que favorece a utilização de painéis fotovoltaicos, principalmente em locais distante da rede elétrica. Visando melhorar a qualidade de vida e minimizar o problema da falta de água potável nessas regiões, esse trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de um protótipo de equipamento para fins de dessalinizar águas salobras via osmose inversa, fazendo uso de um gerador fotovoltaico com a utilização de um circuito eletrônico, no qual substitui acumuladores de carga (baterias). Com o uso do circuito eletrônico foi possível produzir água potável sem a necessidade da utilização de acumuladores de carga (baterias) e sem danificar o motor-bomba. A ausência do banco de baterias proporciona uma redução dos custos e da necessidade de manutenção; mas o sistema torna-se subordinado às condições instantâneas da radiação solar e da temperatura ambiente. Esse sistema foi instalado no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), na Universidade Federal de Campina Grande. O desempenho do sistema foi avaliado com soluções de cloreto de sódio com concentração de 1.000 mg/L e 2.500 mg/L e água de poço com concentração de 3.800 mg/L. As variáveis de medidas, como: tensão, corrente, vazão e pressão foram obtidas em tempo real no Software Data Aquisition, através de sensores elétricos. A partir desses dados foram avaliados os seguintes parâmetros: potência elétrica, vazão do permeado e do concentrado, recuperação e consumo de energia por m^3 de água produzida. As condições meteorológicas e as concentrações da água de alimentação influenciam diretamente na pressão, e consequentemente na produção de água. Mesmo com a grande variação de tensão em função da irradiação solar, o sistema mostrou condições técnicas de produzir $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ de água dessalinizada. A pressão máxima obtida foi de $8,2 \text{ kgf/cm}^2$. O balanço econômico, que representa o custo-benefício de implantação, operacional e manutenção para atender comunidades isoladas, mostrou que o menor custo de água dessalinizada é obtido quando o sistema de dessalinização é instalado em localidade na qual já possui o poço tubular e um local para servir de abrigo para o sistema de dessalinização. Para essas localidades é viável o uso de painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave: osmose inversa, dessalinização, painel fotovoltaico.

ABSTRACT

The lack of drinking water in some places of the world, more precisely in the semi-arid region of Brazil, is an old problem, worsened by the pollution, irregular distribution and high salinity of underground waters. On the other hand, those areas possess a great solar irradiation rate that favors the use of photovoltaic panels, mainly where the electric net is not available. Seeking to improve the life quality and to minimize the problem of the lack of drinking water in those areas, the objective of this work is to study and evaluate an osmosis reverse desalination system, using photovoltaic solar energy coupled to an electronic circuit. This electronic circuit replaces the use of batteries without damaging the motor-pump. The absence of batteries provides a reduction of the cost and maintenance need; but the system is subordinated to the instantaneous conditions of the solar radiation. This system was installed at the Reference Laboratory of Desalination (LABDES) in the Federal University of Campina Grande. The system was evaluated with sodium chloride solutions of 1,000 and 2,500 mg/L NaCl concentrations, and a well water of 3,800 mg/L TDS concentration. The meteorological conditions and the concentrations of the feeding water influence directly the applied pressure and consequently the permeate production. Even with the intermittent energy delivered by the solar photovoltaic panels, the desalination system showed good technical conditions to produce 0.25 m³/h of potable water. The economical statements, that the implantation cost-benefit represents, operational and maintenance to take care of isolated communities, showed that the lesser desalinated water cost is gotten when the desalination system is installed in locality in which already possesses the well and a place to serve of shelter for the desalination system. For these localities the use of photovoltaic panels is viable.

Key-words: reverse osmosis, desalination, photovoltaic solar energy

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de permeação da membrana
Al	Alumínio
ΔC	Gradiente concentração
C_a	Concentração da alimentação
CA	Corrente alternada
C_c	Concentração do concentrado
C_p	Concentração do permeado
CC	Corrente contínua
Cd	Cádmio
c_i	Concentração molar do íon i
C_r	Concentração de sais dissolvidos na corrente do concentrado
CV	Destilação por compressão de vapor
E_{exp}	consumo de energia experimental
E_{emp}	Energia empírica consumida
ED	Eletrodialise
FV	Fotovoltaico
I	Corrente elétrica
In	Índio
J_i	Fluxo mássico do soluto
J_w	Taxa de fluxo de permeado
kWh	Quilowatt-hora
kW	Quilowatt
K_w	Coeficiente de transferência de massa do solvente
K_i	Coeficiente de transferência de massa do soluto
L	Litro
m	Massa de ar
MSF	Destilação Flash com Múltiplos Estágio
MED	Destilação Múltiplo Efeito
OI	Osmose inversa
ΔP	Gradiente de pressão aplicada
P_a	Pressão de alimentação

P_c	Pressão do concentrado
P_p	Pressão do permeado
pH	Potencial hidrogeniônico
Q_a	Vazão da alimentação
Q_p	Vazão do permeado
Q_c	vazão do concentrado
r	Recuperação do sistema
R	Constante universal dos gases perfeitos
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Si	Silício
T	Temperatura absoluta da solução
Te	Telureto
TDS_a	Total de sais dissolvidos na corrente da alimentação
TDS_c	Total de sais dissolvidos na corrente do concentrado
TDS_p	Total de sais dissolvidos na corrente do permeado
TRS	Taxa de rejeição de sais
V	Volt
W	Watt

SÍMBOLOS GREGOS

v_i	Carga elétrica do íon i
ρ_a, ρ_p, ρ_c	Densidade da solução de alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente
ρ	massa específica do ar
$\Delta\pi$	Gradiente de pressão osmótica
π	Pressão osmótica
κ	Condutividade elétrica
η_b	Eficiência da bomba
η_m	Eficiência do motor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Porcentagem de água no planeta	1
Figura 1.2: Índices percentuais de exclusão elétrica	3
Figura 2.1: Processos de dessalinização	10
Figura 2.2: Osmose	14
Figura 2.3 Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa	14
Figura 2.4: Esquema do sistema de osmose inversa	21
Figura 2.5: Distribuição percentual da radiação solar incidente	28
Figura 2.6: Média de insolação anual do Brasil	29
Figura 2.7: Silício tetravalente	31
Figura 2.8: Bandas de energia de um material não semicondutor e de um material condutor	32
Figura 2.9: Silício dopado com átomo pentavalente	33
Figura 2.10: Silício dopado com átomo trivalente	33
Figura 2.11: Bandas de condução	34
Figura 2.12: Célula fotovoltaica	34
Figura 2.13: Configuração da célula solar	35
Figura 2.14: Arranjo das células em série	36
Figura 2.15: Possível ligação para um diodo bypass entre células	37
Figura 2.16: Diodo de bloqueio	38
Figura 2.17: Conexão de células em paralelo	38
Figura 2.18: Estrutura de um painel fotovoltaico	40
Figura 2.19: Curva Tensão versus corrente	43
Figura 2.20: Sistema fotovoltaico com carga CC sem armazenamento	45
Figura 2.21: Sistema fotovoltaico com carga CC com armazenamento	46
Figura 2.22: Sistema fotovoltaico com carga CA sem armazenamento	46
Figura 2.23: Sistema fotovoltaico com carga CA com armazenamento	47
Figura 2.24: Sistema fotovoltaico básico em blocos	47
Figura 3.1: Sistema de dessalinização via osmose inversa	55
Figura 3.2: Sistema de dessalinização com dois passos	57
Figura 3.3: Vista frontal do sistema de dessalinização	57

Figura 3.4: Vista lateral do sistema de dessalinização	57
Figura 3.5: Vista frontal do quadro de comando	58
Figura 3.6: Vista das membranas de osmose inversa	58
Figura 3.7: Painel fotovoltaico	59
Figura 3.8: Arranjo dos painéis fotovoltaicos	59
Figura 3.9: Curva I x V	60
Figura 3.10: Sistema de armazenamento de dados	62
Figura 4.1: Circuito eletrônico	66
Figura 4.2: Janela do software Agilent BenchLink (Data Acquisition)	67
Figura 4.3: Variação da tensão em função da hora	68
Figura 4.4: Pressão versus a tensão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L	69
Figura 4.5: Pressão versus a tensão do sistema para água de poço com concentração de 3.800 mg/L	70
Figura 4.6: Pressão versus a corrente elétrica para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L	70
Figura 4.7: Pressão versus a tensão para solução de NaCl com concentração de 3.800 mg/L	71
Figura 4.8: Pressão versus a potência elétrica para solução de NaCl com concentração de 2.500mg/L	71
Figura 4.9: Pressão versus a potência elétrica para água de poço com concentração de 3.800mg/L	72
Figura 4.10: Pressão versus a tensão para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L	72
Figura 4.11: Pressão versus a corrente elétrica para a solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L	73
Figura 4.12: Pressão versus a potência elétrica para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L	73
Figura 4.13: Vazão versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L	74
Figura 4.14: Vazão versus a pressão para água de poço com concentração de 3.800 mg/L	75
Figura 4.15: Vazão versus a pressão para solução de NaCl com concentração de	75

1.000 mg/L

Figura 4.16: Recuperação do sistema versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L	77
Figura 4.17: Recuperação do sistema versus a pressão para água de poço com concentração de 3.800 mg/L	77
Figura 4.18: Recuperação do sistema versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L	78
Figura 4.19: Consumo de energia versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L	79
Figura 4.20: Consumo de energia versus a pressão para água de poço com concentração de 3.800 mg/L	79
Figura 4.21: Consumo de energia versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Consumo de energia para destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar.	11
Tabela 3.1: Especificações da membrana de osmose inversa	56
Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico	59
Tabela 3.3: Tipos de águas analisadas	62

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos.....	4
1.1.1 – Objetivo Geral	4
1.1.2 – Objetivos Específicos	4
1.2 . Escopo do Trabalho	5

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Dessalinização	6
2.1.1 Processos de dessalinização	8
2.1.1.1 Processos Térmicos	9
2.1.1.2 Processos de Membranas.....	9
2.1.2 Processo de dessalinização via osmose inversa	11
2.1.3 Incrustações	15
2.1.4 Pré-tratamento e pós-tratamento	15
2.1.5 Principais equações que regem o processo de osmose inversa.....	16
2.1.5.1 Pressão osmótica de uma solução iônica.....	16
2.1.5.2 Fluxo do permeado e do concentrado.....	17
2.1.5.3 Rejeição de sais	19
2.1.5.4 Passagem de sais.....	19
2.1.5.5 Recuperação.....	20
2.1.5.6 Balanço de massa para o sistema de osmose inversa	21
2.1.5.7 Consumo de energia	23
2.2 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL	25

2.2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	25
2.2.2.1 Histórico	25
2.2.1.2 Radiação solar.....	27
2.2.1.3 Conversão fotovoltaica.....	29
2.2.1.3.1 Silício.....	30
2.2.1.3.2 Junção p-n.....	33
2.2.1.5 Módulo fotovoltaico.....	35
2.2.1.6 Armazenamento de energia (Acumuladores/baterias)	40
2.2.1.7 Controlador/regulador de carga	41
2.2.1.8 Inversor/conversor	41
2.2.1.9 Maximum Power Tracking (Seguidor de máxima potência).....	43
2.2.1.10 Sistemas fotovoltaicos autônomos.....	44
2.2.1.10 Configurações básicas	45
2.2.1.10.1 Sistemas com carga CC sem armazenamento	45
2.2.1.10.2 Sistemas com carga CC com armazenamento.....	46
2.2.1.10.3 Sistemas com carga CA sem armazenamento	46
2.2.1.10.4 Sistemas com carga CA com armazenamento.....	47
2.2.1.11 Sistema de conversão fotovoltaica.....	47
2.2.1.12 Vantagens das células solares fotovoltaicas	48
2.2.1.13 Aplicações da energia fotovoltaica	48
2.3 ESTADO DA ARTE	
2.3.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO NO MUNDO	50
2.3.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO NO BRASIL	53

CAPÍTULO III

3 EXPERIMENTAL	55
3.1 Sistema de osmose inversa	55
3.2 Sistema de dessalinização via osmose inversa	56
3.3 Sistema de conversão de energia elétrica	58
3.3.1 Módulos fotovoltaicos	58
3.3.2 Sistema de medição (Aquisição de dados)	60
3.4 Procedimento experimental	62

3.5 Processo de limpeza	63
-------------------------------	----

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS	64
4.1 Sistema de controle – Circuito eletrônico.....	64
4.2 Aquisições de dados	66
4.3 Variação da tensão em função da hora	67
4.4 Tensão, corrente e potência elétrica	68
4.5 Vazão do permeado, do concentrado e da alimentação.....	73
4.6 Recuperação	75
4.7 Consumo de energia	78
4.8 Balanço de custo de um sistema de dessalinização acionado por fonte renovável	80

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES.....	85
--------------------------	-----------

CAPÍTULO VI

6 PERSPECTIVAS.....	87
----------------------------	-----------

CAPÍTULO VII

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	88
---	-----------

APÊNDICE I – Boletim técnico da membrana.....	98
--	-----------

APÊNDICE II – Especificações do painel fotovoltaico	99
--	-----------

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial, seja como componente bioquímico de seres vivos, como meio de vida de várias espécies vegetais e animais, como elemento representativo de valores sociais e culturais e até como fator de produção de vários bens de consumo final e intermediário. É a substância mais comum e a mais importante na face da terra, sendo que está cada vez mais escassa no planeta. Seu volume total não está se reduzindo, porque não há perdas no ciclo de evaporação e precipitação; o que caracteriza a escassez é a poluição e a sua distribuição irregular, e consequentemente, milhares de pessoas continuam morrendo por sua falta e também pelos seus abastecimentos contaminados.

A superfície terrestre é coberta por 75% de água; sua distribuição apresenta-se da seguinte forma (Figura 1.1): 97% encontram-se nos oceanos e mares, 2% nas calotas e geleiras; 0,3% na atmosfera na forma de vapor de água; 0,1% em rios e lagos e 0,6% de águas subterrâneas (MALLEVIALLE *et al.*, 1996 e KALOGIROU, 2005).



Figura 1.1: Porcentagem de água no planeta (ALMEIDA, 2003).

O mundo está enfrentando uma crise de água. De acordo com a Organização de Alimentos e Agricultura (*Food and Agriculture Organization - FAO*), 20 países sofrem com problemas de escassez de água desde 1990, enquanto que em 1996 o problema já

tinha atingido 26 países (que corresponde a 230 milhões de pessoas). O Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (*United Nations Environment Programme - UNEP*), calcula que até 2027 aproximadamente, um terço da população do mundo sofrerá sérios problemas de escassez de água (CARTA *et al.*, 2003).

O Brasil é um grande reservatório de água do mundo, pois tem a maior reserva hidrológica do planeta - 11, 6 % da água doce disponível estão no Brasil, que perfazem 53% dos recursos hídricos da América do Sul. Mas essa água é mal distribuída, 80% concentram-se na Amazônia, onde vivem apenas 5 % dos habitantes do país; os 20% restantes abastecem 95% dos brasileiros. Sua ausência é sinônima de pobreza e desequilíbrio sócio-econômico (PLANETA ORGÂNICO, 2005).

A região Nordeste, formada pelos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Alagoas, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe e Bahia, está dividida em cinco grandes zonas: litoral, zona da mata, agreste sertão e meio norte. A variação climática que essa região enfrenta ao longo de cada ano é um dos parâmetros responsáveis pela falta de água para o consumo humano, acarretando em um dos problemas sociais e econômicos da região. Isto se deve ao fato desta região ser caracterizada por condições semi-áridas, apresentando em sua formação litológica cerca de 90% do território nordestino constituído por rochas cristalinas (fendas/fratura) e apenas 10% formado por rochas sedimentares (SEVERINO *et al.*, 2005).

Esse tipo de caracterização afeta a forma da distribuição dos recursos hídricos, uma vez que esses tipos de solos oferecem diferentes índices de porosidade e de permeabilidade; como é o caso das rochas cristalinas, que normalmente apresentam uma baixa permeabilidade e condicionam uma circulação lenta dos fluidos e conseqüentemente maior tempo de permanência das águas percoladas nos aquíferos. Esse fato, de certa forma vem contribuir para a salinização dos mananciais hídricos ao longo do tempo.

Em busca de soluções, as águas subterrâneas têm sido mais exploradas pelo homem, mas constata-se que as águas subterrâneas das áreas do “polígono das secas”, devido ao seu alto grau de salubridade, tornam-se impróprias para o consumo humano e animal, e para a irrigação, se agravando mais, no período de longa estiagem. A distribuição do consumo de água é da seguinte forma: 70 % é usada na agricultura, 20 % na indústria e apenas 10 % é de uso residencial (KALOGIROU, 2005).

Ao lado de medidas convencionais para aumentar a oferta de água potável, tais como, construção de cisternas e açudes, o uso de dessalinizadores, tem despertado grande interesse. Os poços artesianos, principalmente os das bacias cristalinas, caso do semi-árido, apresentam-se na sua grande maioria com água salobra que, uma vez dessalinizada, apresenta-se como uma excelente solução. Esses fatores fizeram com que muitos países (mais desenvolvidos tecnicamente) investissem maciçamente nas pesquisas de dessalinização, destacando-se Inglaterra, EUA, França, Israel, Japão e Alemanha.

Para diminuir o índice de concentração de sais e tornar a água potável existem várias técnicas de dessalinização, mas o processo que predomina é a osmose inversa (PESTANA *et al.*, 2004). A osmose inversa (OI) é uma técnica de filtração que remove os constituintes dissolvidos em solventes (AMJAD, 1993).

O acesso à energia é base importante da existência humana; essencial à satisfação de necessidades básicas tais como alimentação, vestuário, habitação e também de mobilidade e de comunicação. Porém, a dependência mundial da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia e suprimento de uma demanda sempre crescente, tanto nos países industrializados como naqueles em desenvolvimento, já ameaça a estabilidade ecológica da Terra.

No Brasil, o governo federal institui um programa com o desafio de acabar com a exclusão elétrica no país. É o programa LUZ PARA TODOS, que tem o objetivo de levar energia elétrica para o meio rural até 2008. A Figura 1.2 apresenta o índice percentual de exclusão de energia elétrica nas diversas regiões do país (PROGRAMA LUZ PARA TODOS, 2006).

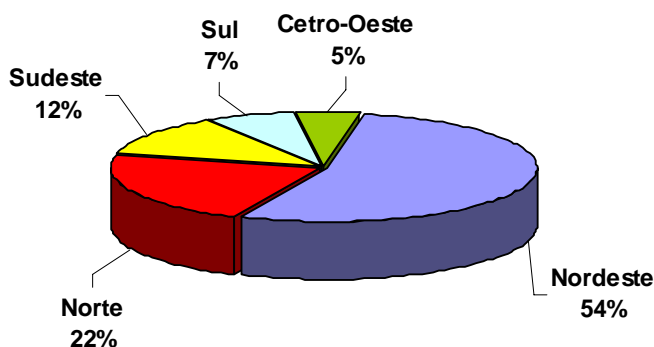


Figura 1.2: Índices percentuais de exclusão elétrica (PROGRAMA LUZ PARA TODOS, 2006).

No interior do Nordeste, além do problema do alto teor de sais na água, algumas comunidades se encontram isoladas, sem acesso a água de boa qualidade e sem energia elétrica.

Para ultrapassar estes obstáculos, as fontes de energia alternativas também denominadas de fontes renováveis, como a solar, são consideradas inextinguíveis, limpas, com mínimo impacto ambiental, apresentando na atualidade uma contribuição energética cada vez mais significativa, logo, podem ser usadas para sistemas de dessalinização (FRANÇA *et al.*, 2000) em áreas remotas e áridas/semi-áridas (MOHSEN *et al.*, 2001).

A conversão fotovoltaica é hoje uma tecnologia madura e competitiva para pequenas instalações em locais remotos, onde podem ter um vasto campo de utilização em projetos de eletrificação rural, abastecimento de água, irrigação, agroindústria, comunicações e bombeamento de águas. Os sistemas fotovoltaicos apresentam características sumamente atrativas tais como: modularidade, não possuem partes móveis, baixos custos de manutenção e potencialmente uma longa vida útil. Trata-se, portanto, de uma tecnologia que apresenta enorme potencial de desenvolvimento e capacidade para atender uma variedade de necessidades sociais e econômicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de um dessalinizador via osmose inversa fazendo uso de painéis solares fotovoltaicos com a utilização de um circuito eletrônico cuja uma das funções é a substituição de acumuladores (baterias).

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver um sistema de dessalinização usando painéis fotovoltaicos com um circuito eletrônico substituindo a utilização de acumuladores de carga.

-
- b) Analisar o desempenho do sistema com soluções de cloreto de sódio e água de poço tubular.
 - c) Desenvolver mecanismo de controle para as variáveis de medidas, bem como introduzir sensores de pressão e vazão.
 - e) Realizar um balanço econômico representando o custo-benefício de implantação, operacional e manutenção para atender a comunidades isoladas.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho está subdividido em sete capítulos.

No capítulo 1, encontra-se a introdução, os objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2, está descrita a fundamentação teórica, na qual aborda as tecnologias de dessalinização, dando ênfase à osmose inversa, e a energia solar fotovoltaica.

No capítulo 3 apresenta-se a parte experimental, descrevendo os materiais selecionados para o desenvolvimento da pesquisa e o procedimento metodológico.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados esperados do sistema de dessalinização.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões.

No capítulo 6, são apresentadas as perspectivas para trabalhos futuros.

No capítulo 7, são apresentadas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dessalinização

O fenômeno da osmose é de fundamental importância na natureza já que o transporte seletivo através de membranas é essencial à vida e começou a ser estudado a mais de duzentos anos.

A osmose inversa (OI) é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com auxílio de um gradiente de pressão, pode rejeitar sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas moléculas orgânicas (OZAKI, 2002). As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada, denominada de permeado. A parcela restante da água de alimentação que não atravessa a membrana é conhecida como concentrado ou rejeito.

O primeiro registro que se tem notícia sobre um estudo relativo a fenômenos de OI que ocorreram com membranas data de 1748 e se deve a um abade francês Abbe Nollet (LONSDALE, 1982). Em sua experiência, Nollet emergiu em água pura, um copo cheio de um destilado de vinho (para efeito do problema, uma simples mistura de água e etanol), vedado com uma bexiga (membrana) de origem animal. Após certo tempo, ele observou que a bexiga se estufou, chegando mesmo a romper em alguns casos (BODDEKER, 1995). Esta experiência evidenciou pela primeira vez, as características de semi-permeabilidade de uma membrana.

Somente em 1855, mais de 100 anos após a experiência de Nollet, Fick publicou sua lei da difusão, que até hoje é utilizada para descrever muitos fenômenos que ocorrem em membranas. Alguns anos mais tarde, Graham estudou a permeação de gases através de borrachas e efetuou as primeiras medidas experimentais de diálise utilizando membranas sintéticas. Ainda na segunda metade do século passado Traube, Pfiffer e Van't Hoff estudaram o fenômeno osmótico, que serviu de base para a

descrição termodinâmica deste fenômeno, no caso de soluções diluídas – lei de Van't Hoff.

A primeira membrana sintética foi desenvolvida em 1867 por Moritz Traube (TRAUBE, 1867). Os processos de separação com membranas começaram realmente, a deixar de ser uma curiosidade científica e de laboratório no final da década dos anos 50. Nessa época começou nos Estados Unidos, um plano de pesquisa em dessalinização de águas que resultou em pelo menos, duas descobertas importantes:

- 1) Em 1953, Reid propôs a dessalinização de água pelo processo de osmose inversa e investigou a permeabilidade de vários tipos de membranas sintéticas (BRANDT *et al.*, 1993).
- 2) Em 1957, Reid e Breton relataram que membranas homogêneas de acetato de celulose, quando utilizadas para osmose inversa, podiam apresentar retenção salina elevada, logo apresentavam um bom desempenho como membranas semipermeáveis, sendo que a taxa de permeabilidade para a água era muito baixa para uso prático (NISHIMURA, 1992).

Loeb e Sourirajan (1960-1962) aperfeiçoaram uma técnica para preparo das membranas utilizadas no processo de dessalinização de água por OI. Mais tarde essa técnica passou a ser chamada de inversão de fase por imersão-coagulação, que podia aumentar muito o fluxo do permeado de água, mantendo elevada a retenção de sais (HABERT *et al.*, 2006). A partir destes fatos, o interesse sobre o assunto aumentou consideravelmente, pois a melhoria na seletividade e a redução da resistência ao transporte das espécies permeantes representavam alterações que poderiam tornar os processos com membranas comercialmente viáveis, não somente para a dessalinização de águas, mas também para os processos de separação tradicionais em geral.

Em 1977, surgiram às membranas de poliamida que são resistentes ao ataque microbiológico, exibem grande tolerância a pH, porém se degradam na presença de cloro e possuem estrutura assimétrica, muito similar ao da membrana de acetato de celulose (SILVA, 1995).

Durante os anos 80, os processos de separação com membranas passaram por um rápido desenvolvimento. Com o uso de tecnologias avançadas foi possível aumentar a taxa de rejeição de sais e o fluxo de água para água salobra e água do mar. Comercialmente, as membranas que vêm predominando são as aramidas, acetato e

triacetato de celulose, apresentando modelo de configurações em espiral e fibra oca (AMJAD, 1993).

Atualmente o desenvolvimento tecnológico de membranas, com a incorporação de novos materiais de menor custo e mais eficientes, tem permitido de forma significativa à ampliação do seu mercado e, por conseguinte a escala de produção.

2.1.1 Processos de dessalinização

A dessalinização de água do mar e água superficial vem sendo utilizada ao longo de 40 anos. Os processos de dessalinização surgiram com o objetivo de remover os sais da água, tornando-a potável. No final de 2001, a capacidade de plantas instaladas no mundo era de aproximadamente 33 mil m³ por dia. A região do Golfo é onde se encontra o maior número de dessalinizadores (cerca de 65%), devido a grande escassez de água potável (ABBAS, 2005 e HAMAD, 2005).

Hoje, o número de plantas instaladas no mundo já é bem superior ao ano de 2001, devido aos contrastes climáticos dos últimos tempos.

A água é classificada em quatro grupos: águas doces (concentração de 0 – 1.000 mg/L), salobras (concentração de sais de 1.000 – 10.000 mg/L), salinas (concentração de sais de 10.000 – 100.000 mg/L) e salmouras (concentração acima de 100.000 mg/L) (FAURE, 1991 e KAHDIM *et al.*, 2003).

De acordo com a Organização Mundial de Saúde o limite de salinidade permissível para água potável é de 500 mg/L e para alguns casos pode chegar a 1.000 mg/L (KALOGIROU, 2005).

Desde a década dos anos 80, o emprego de membranas semipermeáveis sintéticas em aplicações industriais passou a se difundir, ampliando o campo de aplicação deste processo. Isto resulta em contínuas reduções de custo, não só pela maior escala de produção permitida como também pelo crescente conhecimento tecnológico adquirido.

Existem diferentes tecnologias de dessalinização, as quais são divididas em dois grupos de acordo com as características do processo: Processos térmicos, no qual a água é submetida à mudança de fase, e o processo de membranas, onde não há mudança de fase.

2.1.1.1 Processos Térmicos

Estes processos utilizam o princípio da destilação para a purificação de águas. Isto é, quando uma solução salina é aquecida, durante a mudança de fase da água, os sais dissolvidos, por serem relativamente não-voláteis, permanecem na solução à medida que a água evapora. Na sequência do processo o vapor é condensado em uma superfície fria, gerando água doce (EL-DESSOUKY, 2002).

Os principais processos térmicos são:

- Destilação Flash com Múltiplos Estágios (MSF)
- Destilação Múltiplo Efeito (MED)
- Destilação por compressão de vapor (CV)

2.1.1.2 Processos com Membranas

As tecnologias de separação por membranas beneficiaram o desenvolvimento de novos tipos de membranas mais seletivas e mais permeáveis e tornaram-se mais competitivas. Em muitas áreas de atividade, estas tecnologias têm custos de capital e de funcionamento inferiores aos dos processos de separação clássicos.

Ao longo dos últimos 30 anos, as membranas começaram a ser utilizadas em vários processos industriais como agentes de separação de componentes. A sua aplicabilidade tem-se alargado com o tempo e atualmente os processos de separação por membranas são utilizados em diversas áreas.

O processo de separação por membranas é a melhor opção para tratamento de água sem a utilização de produtos químicos (ARORA *et al.*, 2004).

Os principais processos de membranas são:

- Osmose inversa (OI)
- Eletrodialise (ED)

Dentre os diversos processos de dessalinização os mais usados são a OI e a destilação flash com múltiplo efeito (MED), no qual o mercado é de 62.0% e 14.0%, respectivamente, a capacidade instalada no mundo (TZEN, 2003), como mostrado na Figura 2.1.

Para água salobra a técnica mais utilizada é OI e para água do mar os processos térmicos. Todavia, nos últimos anos, a OI tem aumentado significativamente o mercado para a dessalinização da água do mar, devido os significativos progressos na tecnologia de membranas e nas vantagens que esta tecnologia oferece com relação aos processos térmicos de dessalinização (MSF e destilação múltiplo efeito – MED. As vantagens da OI inclui baixo consumo de energia, baixa temperatura de operação e custo de produção de água pequeno.

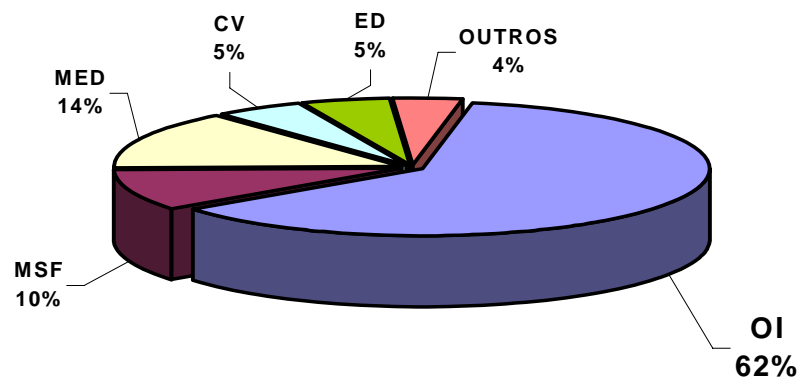


Figura 2.1: Processos de dessalinização (TZEN, 2003).

O desempenho de um processo de dessalinização de OI é afetado por muitos fatores, os quais incluem:

- 1 a condição da água bruta e o efetivo procedimento do pré-tratamento;
- 2 a membrana: tipo, tamanho e número de módulos usado e o arranjo;
- 3 a taxa e o grau de incrustação (fouling) e habilidade de limpeza;
- 4 as condições de operação, como pressão, temperatura e recuperação do permeado;
- 5 a eficiência da bomba (alta pressão e bomba auxiliar) e o sistema de recuperação de energia (ABBAS, 2005).

As energias usadas nos processos de dessalinização são principalmente, eletricidade e calor. As exigências de energia para plantas de dessalinização dependem da salinidade e temperatura da água de alimentação, da qualidade da água produzida e a tecnologia utilizada.

O processo de OI apresenta um consumo de energia inferior aos outros processos de dessalinização (CHILDS *et al.*, 1999 e MORENO, 2004), como pode ser visto na Tabela 2.1.

A energia representa aproximadamente 25 – 40 % do custo total do sistema de dessalinização de água (TSIOURTIS, 2001).

Os avanços tecnológicos em transferência de calor, tecnologia de membrana, recuperação do mecanismo de energia, manufatura do tratamento químico da água e combinação dos métodos ou processos têm reduzido o consumo de energia por metro cúbico (TSIOURTIS, 2001).

Em relação aos processos de dessalinização comercializados, a OI é considerada como o processo mais atrativo para a produção de água potável a partir de água salobra e água do mar (JOYCE *et al.*, 2001).

As plantas de dessalinização são usadas em mais de 120 países (IDA, 2000). Os países do Oriente Médio usam a tecnologia de dessalinização representando mais de 50% da capacidade do mundo, seguido, a América do Norte com 19%, a Europa com 13%, a Ásia com 12% e a África com 6% (TSIOURTIS, 2001).

Tabela 2.1: Consumo de energia para destilação e osmose inversa para dessalinização da água do mar (AMJAD, 1993).

Processos	Energia total consumida (kWh/m ³ produzido)	Temperatura máxima de operação (°C)
Destilação flash com múltiplo estágio (MSF)	9,52	95
Destilação múltiplo efeito (MED)	6,87	75
Destilação por compressão de vapor (VC)	9,25	100
Osmose inversa (OI)	4,76	45

2.1.2 Processo de dessalinização via osmose inversa

A osmose inversa é um método de dessalinização de grande sucesso aplicado para água do mar, água salobra e água industrial (ABDEL-JAWAD *et al.*, 1993). Para o

processo ocorrer, depende das propriedades da semipermeabilidade da membrana e da aplicação de uma pressão superior a pressão osmótica da solução (CHILDS *et al.*, 1999). A membrana atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com peso molecular acima de 100 g/mol. As rejeições típicas de sais dissolvidos para águas salobras atingem a marca de 95 a 99% (HYDRANAUTICS, 1998) e para a água do mar valores superiores a 99% (MOHSEN *et al.*, 2001).

As membranas de osmose inversa são capazes de separar microsolutos dissolvidos com peso molecular inferior a 500 g/mol através do mecanismo de solução/difusão. Quando o peso molecular das partículas do soluto exceder este valor, o mecanismo de separação será determinado pelo tamanho das partículas presentes na solução e pelo diâmetro dos poros existentes na membrana.

Este processo pode reduzir sais, dureza, microorganismos em geral e patogênicos em particular, turbidez, compostos orgânicos, pesticidas e a maioria dos contaminantes presentes na água, deixando-a dentro dos padrões recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS), mas muitos dos gases dissolvidos tais como sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, irão passar através da membrana de OI (TAYLOR, 1996).

A osmose inversa tem se mostrado como um dos processos mais modernos para dessalinização de águas salobras e água do mar (HABERT *et al.*, 2006). Além da dessalinização de águas, a osmose inversa vem sendo empregada em recuperação de efluentes industriais, concentração de sucos, produtos farmacêuticos, processamento de alimentos e bebidas, soro do leite na fabricação do queijo, diálises, obtenção de água ultrapura, etc. (BRANDT *et al.*, 1993). As vantagens da osmose inversa incluem o baixo consumo energético, custos de capital e de operação relativamente baixos, necessidade de pequenos espaços e facilidades na construção, operação e manutenção, devido à natureza modular do processo (MOHSEN *et al.*, 2001).

A osmose natural ocorre quando duas soluções de concentrações diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Neste caso, a água (solvente) da solução menos concentrada tenderá a passar para o lado da solução de maior salinidade (Figura 2.2). Com isto, esta solução mais concentrada, ao receber mais solvente, se dilui, num processo impulsionado por uma grandeza chamada “pressão

osmótica”, até que as duas soluções atinjam o equilíbrio osmótico (JOYCE *et al.* 2001 e KALOGIROU, 2005).

A osmose inversa é um processo induzido que ocorre quando se aplica uma pressão no lado da solução mais salina ou mais concentrada, revertendo-se a tendência natural. Neste caso, a água da solução salina passa para o lado da solução menos concentrada, ficando retidos os íons dos sais nela dissolvidos (Figura 2.2). A água obtida é denominada de permeado, ou produto, e a solução concentrada de concentrado ou rejeito (JOYCE *et al.*, 2001).

Em processo de grande escala isso ocorre com um auxílio de uma bomba de alta pressão, sob um fluxo contínuo, passando por um permeador, onde fica situada a membrana. A pressão a ser aplicada equivale a uma pressão maior que a pressão osmótica característica da solução.

Para a dessalinização de água salobra a pressão de operação é na ordem de 17 a 27 kg/cm² (1.667 a 2.648 kPa) e para a água do mar essa pressão é na faixa de 54 a 68 kg/cm² (5.296 a 6.669 kPa) (MOHSEN *et al.*, 2001).

Na dessalinização de águas salobras e do mar as membranas mais utilizadas são as de fibra oca e espiral (SCOTT, 1997 e KAHDIM *et al.*, 2003).

No modelo de fibras ocas a água afluenta, sob alta pressão, corre sobre a superfície externa das fibras. A água permeada escoar para fora, através da base destas fibras, e é coletada como produto.

O modelo em espiral é constituído por um envoltório de membrana em torno de um espaçador (Figura 2.3). Este conjunto é ligado a um tubo perfurado, localizado numa das extremidades do envoltório da membrana. Toda a estrutura do envoltório da membrana é enrolada em torno do tubo, ao modo de rocambole, e o conjunto inserido em um vaso de pressão cilíndrica. O fluido escoar sobre a membrana, enquanto que o permeado flui para um sistema coletor por intermédio de um tubo interno (SCHWINGE *et al.*, 2004).

Os espaçadores mantêm as membranas separadas promovendo um caminho de fluxo que provoca turbulência, diminuindo assim problemas de incrustações (SUDAK, 1990).

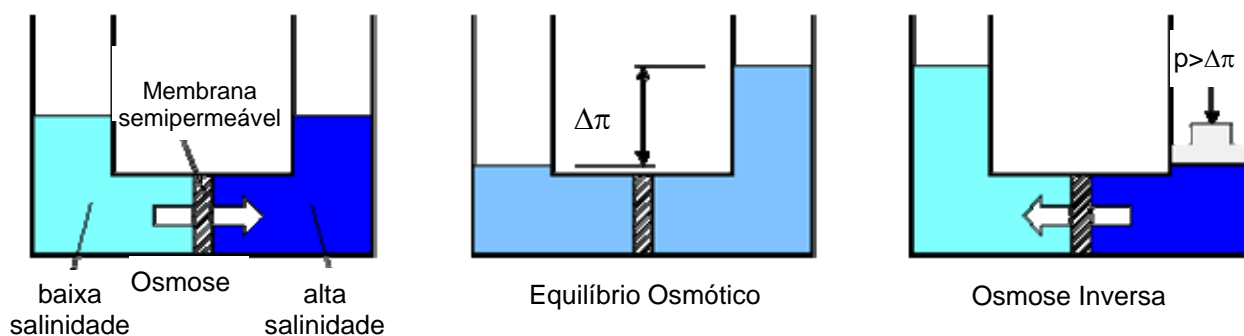


Figura 2.2: Osmose (MALLEVIALLE *et al.*, 1996).

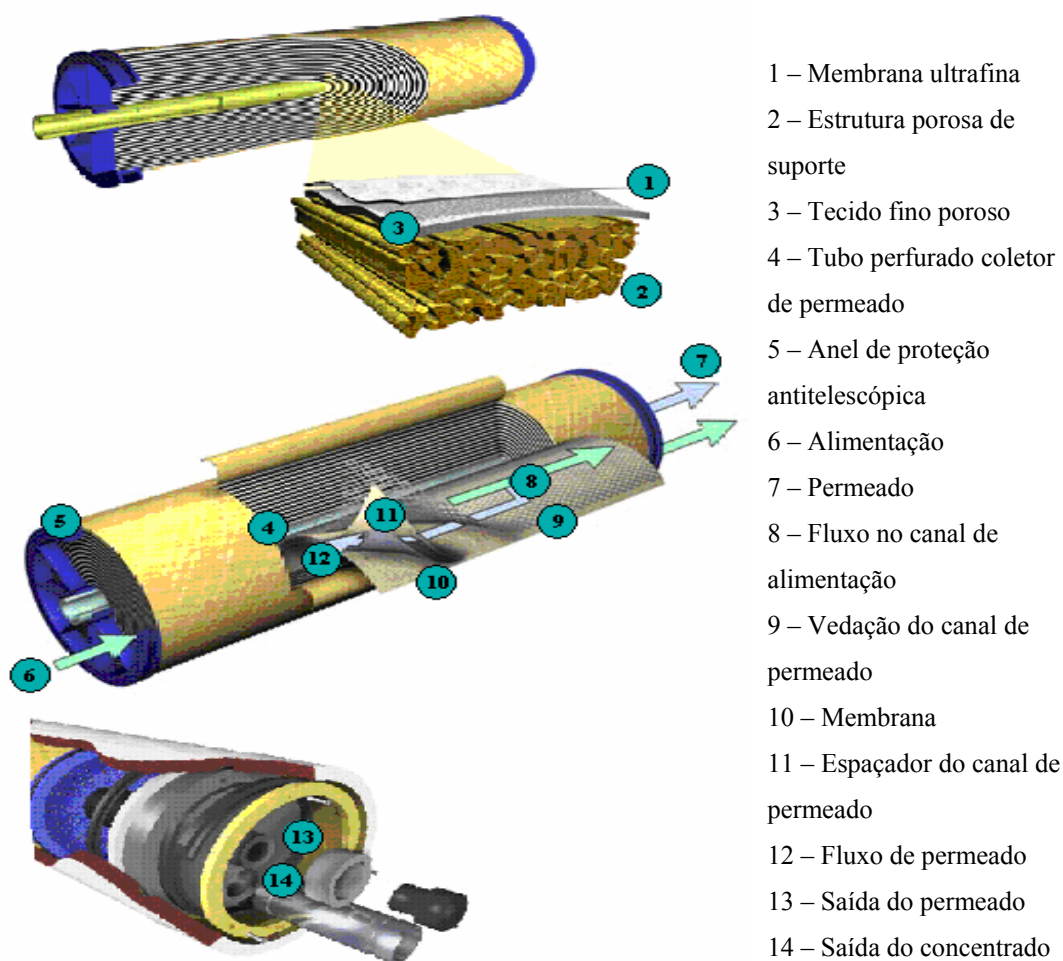


Figura 2.3: Elemento de membrana em espiral para o processo de osmose inversa (GLEGG, 2006).

2.1.3 Incrustações

As incrustações são fenômenos, capazes de provocar uma queda no fluxo do permeado e/ou o aumento da passagem de sais com o tempo. Há incrustantes formados por materiais em suspensão (fouling), de natureza orgânica, como: lodo, colóides, bactérias e outras espécies biológicas (BRANT *et al.*, 1993); e também formados por depósitos minerais inorgânicos (scaling), insolúveis nas condições de pH e temperatura ambiente, que se precipitam na superfície da membrana, tais como: sílica (SiO₂), hidróxido de ferro, carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, carbonato de magnésio, sulfato de bário, sulfato de estrôncio (BENNET *et al.*, 1996).

Para evitar o surgimento das incrustações utilizam-se técnicas de pré-tratamento na água de alimentação (MADAENI, 2001).

A polarização por concentração é dos fatores mais importantes que influencia no desempenho dos processos de separação de membranas (KIM *et al.*, 2005). É um fenômeno que ocorre quando o acúmulo de sais próximo à superfície da membrana é maior do que a concentração média da água que flui em volta da superfície considerada, resultando em redução acentuada no fluxo de permeado. Com o aumento de sal na interface, há um aumento da pressão osmótica da solução, o que diminui a pressão e impede a passagem da água através da membrana. A concentração por polarização também leva à destruição das superfícies sensíveis (BYRNE, 2002).

2.1.4 Pré-tratamento e pós-tratamento

O pré-tratamento é uma das etapas de grande importância para o sistema de dessalinização. Pois, ele evita a formação de incrustações na água de alimentação, pela remoção de partículas micropoluentes e microrganismos, bem como a prevenção da formação de incrustante inorgânico, melhorando a qualidade da água de alimentação e contribuindo para que o tempo de vida útil da membrana não seja reduzido.

O tipo de pré-tratamento, a ser utilizado, irá depender da qualidade da água de alimentação. Está definido em termos de concentração de partículas suspensas e níveis de saturação de sais solúveis dispersos no meio. Alguns dos sais mais conhecidos são:

sulfato de cálcio, fosfato de cálcio, fluoreto de cálcio, sulfato de bário e de estrôncio e sílica (SUDAK, 1990).

Um pré-tratamento adequado compõe-se do uso de filtro de areia (sólidos suspensos), carvão ativado (cloro livre), cloração (matéria orgânica), clarificação (turbidez), aeração (ferro), acidificação com H_2SO_4 ou HCl ou alcalinização com NaOH (correção do pH), membranas de ultra-filtração, anti-incrustantes, filtros de cartucho, etc.

Dependendo da qualidade e do uso da água permeada esta poderá passar por um pós-tratamento. Poderá haver necessidade de correção do pH, desinfecção, remoção de sulfeto de hidrogênio por oxidação e aeração, fluoração da água para evitar cáries dentárias, colunas de troca iônica para produção de água ultrapura, remoção de gás carbônico por aeração.

2.1.5 Principais equações que regem o processo de osmose inversa

2.1.5.1 Pressão osmótica de uma solução iônica

A pressão osmótica que uma solução iônica exerce depende da concentração do soluto, da temperatura absoluta da solução, e da espécie de íons presentes. Quanto maior for a concentração da solução, maior será o valor da pressão osmótica dessa solução (BRANDT *et al.*, 1993). A pressão osmótica é dada pela equação de Van't Hoff:

$$\pi = \sum v_i c_i RT \quad 2.1$$

Onde:

π - pressão osmótica (kgf/cm^2)

v_i - carga elétrica do íon i ;

c_i - concentração molar (mol/L);

R - constante universal dos gases perfeitos ($\text{kgf.L/cm}^2 \cdot \text{mol.K}$);

T - temperatura absoluta da solução (K).

Esta equação é válida para soluções diluídas. Para soluções concentradas ela é multiplicada por um coeficiente osmótico que é estimado de dados de pressão de vapor ou do ponto de congelamento da solução avaliada. No processo de osmose inversa tem-

se que aplicar uma pressão superior à pressão osmótica na membrana para que haja produção de permeado. A pressão osmótica é função da concentração de sais e do tipo das moléculas orgânicas contidas na água de alimentação.

O aumento do nível de recuperação do sistema faz com que, mais água seja convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor de sais dissolvidos na corrente de concentrado, assim como a possibilidade de sua precipitação na superfície da membrana.

2.1.5.2 Fluxo do permeado e do concentrado

Na osmose inversa os sais dissolvidos e moléculas orgânicas retidas na superfície da membrana causam o aumento da concentração próxima à superfície considerada. Este aumento de concentração causa aumento no valor da diferença de pressão osmótica da solução, o que tende a diminuir o fluxo de permeado.

O fluxo do permeado através de uma membrana de osmose inversa é inversamente proporcional à área da membrana e proporcional à variação de pressão osmótica e hidráulica (TAYLOR, 1996), é dado pela seguinte equação:

$$J_W = K_w * (\Delta P - \Delta \pi) = Q_p / A \quad 2.2$$

Onde:

J_w - taxa de fluxo de permeado (L/cm².min);

K_w - coeficiente de transferência de massa do solvente (L/kgf.min);

ΔP - gradiente de pressão aplicada (kgf/cm²);

$\Delta \pi$ - gradiente de pressão osmótica (kgf/cm²);

Q_p - vazão do permeado (L/min);

A - área de permeação da membrana (cm²).

O transporte de sais através da membrana é proporcional à concentração ou à diferença de potencial químico e depende de concentração e independe da pressão aplicada ao sistema (TAYLOR, 1996). Logo, o fluxo do concentrado pode ser representado por:

$$J_i = k_i \Delta C = Q_p C_p / A \quad 2.3$$

Na qual:

J_i - fluxo mássico do soluto ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$);

k_i - coeficiente de transferência de massa do soluto (cm/min);

ΔC - gradiente concentração (g/L);

Q_p - vazão do permeado (L/min);

C_p - concentração do permeado (g/L).

ΔP , $\Delta \pi$ e ΔC são dados por:

$$\Delta P = (P_a + P_c) / 2 - P_p \quad 2.4$$

$$\Delta \pi = (\pi_a + \pi_c) / 2 - \pi_p \quad 2.5$$

$$\Delta C = (C_a + C_c) / 2 - C_p \quad 2.6$$

Onde:

P_a , P_c , P_p são a pressão de alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

π_a , π_c , π_p são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

C_a , C_c , C_p são a concentração da alimentação, do concentrado e do permeado, respectivamente.

$\Delta \pi$ pode ser dado ainda por:

$$\Delta \pi = [(TDS_a + TDS_c) / (2 - TDS_p)] * 7,033 * 10^{-4} \quad 2.7$$

Na qual:

$\Delta \pi$ - gradiente de pressão osmótica (kgf/cm^2)

TDS_a - sólidos totais dissolvidos na corrente da alimentação

TDS_c - sólidos totais dissolvidos na corrente do concentrado

TDS_p - sólidos totais dissolvidos na corrente do permeado (MALLEVIALLE *et al.*, 1986).

O TDS é dado em mg/L e $\Delta\pi$ é dado em kgf.cm⁻². O fator de conversão $7,033 \times 10^{-4}$ converte a pressão para kgf/cm².

2.1.5.3 Rejeição de sais (RS)

A rejeição de sais (RS) refere-se à capacidade da membrana de rejeitar sais dissolvidos durante a permeação da água (CHEN *et al.*, 1997). Devido à água e os sais terem taxas de transferência de massa diferentes, ocorre o fenômeno da rejeição dos sais.

$$RS(\%) = [(C_a - C_p) / C_a] * 100 \quad 2.8$$

Onde: RS(%) - rejeição de sais.

C_a - concentração de alimentação (mg/L).

C_p - concentração do permeado (mg/L).

A remoção de sais indica a efetividade da remoção de sais e outras espécies químicas pela membrana, possuindo valores que variam de 90 a 99,8%, dependendo do tipo de membrana utilizada e da água de alimentação (HYDRANAUTICS, 1998).

2.1.5.4 Passagem de sais (PS)

É oposta a rejeição de sais. Refere-se à porcentagem do sal na água de alimentação que atravessa a membrana, ela é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$PS(\%) = \left(\frac{C_p}{C_a} \right) * 100 \quad 2.9$$

Onde: PS(%) – passagem de sais.

C_a – concentração inicial de sais dissolvidos na corrente de alimentação (mg/L).

C_p – concentração de soluto na corrente de permeado (mg/L).

2.1.5.5 Recuperação

A recuperação $r(\%)$ ou conversão refere-se à razão da água convertida em água purificada ou permeada Q_p , e depende de vários fatores, como a formação de incrustações na superfície das membranas, pressão osmótica e a qualidade do permeado. A recuperação do sistema é dada pela seguinte expressão (BYRNE, 2002):

$$r(\%) = \left(\frac{Q_p}{Q_a} \right) \cdot 100 \quad 2.10$$

Onde:

r - nível de recuperação do sistema.

Q_p - vazão do permeado (m^3/h)

Q_a - vazão da alimentação (m^3/h)

Sabe-se que:

$$C_a Q_a = C_p Q_p + C_c Q_c \quad 2.11$$

Se o fluido é incompressível e a solução é diluída, a densidade é constante, então:

$$r(\%) = \left[\left(\frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \right) \right] * 100 \quad 2.12$$

Onde: C_a , C_p e C_c são as concentrações da alimentação, do permeado e do concentrado, respectivamente, e Q_c é o fluxo volumétrico do concentrado.

A recuperação máxima em qualquer instalação de osmose inversa depende dos componentes presentes na água de alimentação, da pressão aplicada, da área de transferência de massa e do tipo de membrana utilizada no processo (SILVEIRA, 1999). Com o aumento do nível de recuperação do sistema, mais água bruta é convertida em produto. Isto reduz o volume da água a ser rejeitada e, conseqüentemente, aumenta o valor da concentração de sais dissolvidos na corrente de rejeito.

2.1.5.6 Balanço de massa e de energia para o sistema de osmose inversa

As leis de conservação ocupam um lugar especial na ciência e na engenharia. Um enunciado comum desta lei é “a massa (ou a energia) não é criada ou destruída”. Assim, os cálculos de balanço de massa e energia constituem-se quase sempre, num pré-requisito para todos os outros cálculos na resolução de problemas simples e complexos de engenharia química. Na indústria de processamento, por exemplo, estes balanços ajudam no planejamento do projeto do processo, na avaliação econômica de processos propostos ou existentes, no controle e otimização de processos, etc. (HIMMELBLAU, 1984).

Para o sistema de dessalinização via osmose inversa (Figura 2.4) o balanço de massa é dado pela seguinte expressão:

$$Q_a C_a = Q_p C_p + Q_c C_c \quad 2.13$$

Na qual:

Q_a - vazão da alimentação (L/min);

Q_p - vazão do permeado (L/min);

Q_c - vazão do concentrado (L/min);

C_a - concentração de alimentação (mg/L);

C_p - concentração do permeado (mg/L);

C_c - concentração do concentrado (mg/L).

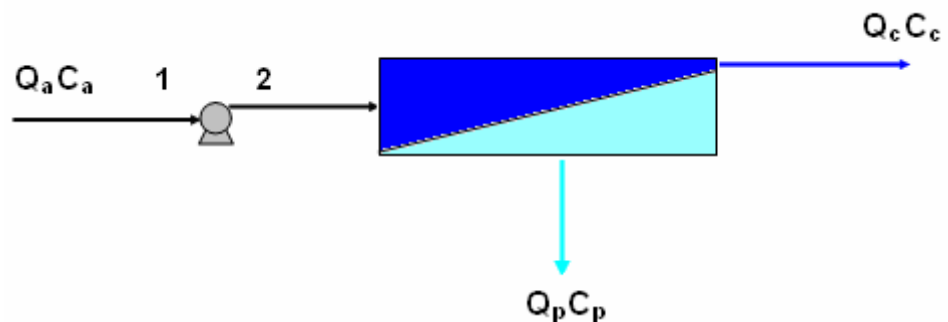


Figura 2.4: Esquema do sistema de osmose inversa

O balanço de energia (FOUST *et al.*, 1982) pode ser feito para o sistema experimental de osmose inversa deste trabalho entre os pontos 1 e 2 da Figura 2.4 e tem

por objetivo obter a potência da bomba de alta pressão. O balanço de energia é definido pela equação 14.

$$\Delta E + \Delta \left(\frac{v^2}{2g_c \varepsilon} \right) + \Delta Z \cdot \frac{g_g}{g_c} + \Delta(P_a V) = Q_s - \Sigma F - W_f \quad 2.14$$

Onde:

ΔE - variação de energia interna;

$\Delta(V^2=2g_c \varepsilon)$ - variação de energia cinética do fluido;

$\Delta Z g_g = g_c$ - variação de energia potencial;

$\Delta(P_a V)$ - variação de energia de volume;

Q_s - calor trocado entre o fluido e o ambiente;

ΣF - somatório das perdas de energia por atrito;

W_f - trabalho de eixo produzido.

Para o balanço de energia, fazem-se as seguintes considerações:

$\Delta E = 0$ (não há variação de energia interna);

$\Delta V^2 = 2g_c \varepsilon = 0$ (não há variação de energia cinética do fluido escoante);

$\Delta Z g_g = g_c = 0$ (não há variação de energia potencial do fluido escoante);

$Q_s = 0$ (não há troca de calor no sistema);

$\Sigma F = 0$ (não há perdas de energia por atrito).

Utilizando as considerações acima, a equação 2.14 pode ser escrita como:

$$-W_f = P_{a1} V_1 - P_{a2} V_2 \quad 2.15$$

onde: P_{a1} e P_{a2} são as pressões nos pontos 1 e 2 da Figura 2.4 e V_1 e V_2 são os volumes específicos destes pontos.

Como,

$$V_1 = \frac{1}{\rho_a} \quad 2.16$$

$$V_2 = \frac{1}{\rho_a} \quad 2.17$$

Tem-se,

$$-W_f = P_{a1} - P_{a2} = \rho_a \quad 2.18$$

Sendo a vazão mássica W dada por

$$W = \rho_a Q_a \quad 2.19$$

A potência elétrica P é dada pelo produto entre o trabalho realizado W_f e vazão mássica w , dividido pela eficiência do motor η_m e da bomba η_b .

$$P = \frac{W_f \cdot w}{\eta_m \eta_b} = \left(\frac{P_{a2} - P_{a1}}{\rho_a \eta_m \eta_b} \right) \cdot \rho_a Q_a = \frac{(P_{a2} - P_{a1}) \cdot Q_a}{\eta_m \eta_b} \quad 2.20$$

2.1.5.7 Consumo de energia

A maior parte do consumo de energia em um sistema de dessalinização é devido à parcela necessária para transferir as espécies iônicas da solução através das membranas e àquela desprendida para bombear as soluções da unidade de dessalinização (MALLEVIALLE *et al.*, 1996).

As bombas para processos de osmose inversa são bombas centrífugas típicas, que são construídas de materiais não corrosivos e operam entre 12 kgf/cm² e 29 kgf/cm². Bombas de alta pressão podem operar até 86,4 kgf/cm² ou mais. Devido ao alto consumo energético, as bombas que operam com água do mar são bombas de deslocamento positivo (MALLEVIALLE *et al.*, 1996).

O consumo de energia está diretamente relacionado com o nível de recuperação do sistema de dessalinização e a eficiência da bomba e do motor trabalhado, como também o número de membranas envolvidas e das soluções no interior do dessalinizador.

A equação empírica geralmente usada para calcular a energia gasta durante o processo de dessalinização é dada por:

$$E_{emp} = \frac{H(0,00315)}{\eta_r \eta_b \eta_m} \quad 2.21$$

Onde:

E_{emp} - energia empírica consumida (kWh/m³);

H – altura do nível da coluna de alimentação (m);

η_r - eficiência de recuperação do sistema;

η_b - eficiência da bomba;

η_m - eficiência do motor;

(0,00315) – fator de conversão de energia para plantas de osmose inversa para kWh/m³ (MALLEVIALLE *et al.*, 1996).

O consumo de energia experimental pode ser obtido através da seguinte equação (PERRY, 1986 e SCHAFER *et al.*, 2007):

$$E_{exp} = \frac{P}{Q_p} \quad 2.22$$

Onde:

E_{exp} - consumo de energia experimental (kWh/m³);

P - potência ativa consumida pelo sistema (W);

Q_p - vazão do permeado (m³/h)

A potência ativa consumida pelo sistema é dada por:

$$P = V * I \quad 2.23$$

Na qual:

V - tensão elétrica (V)

I - corrente elétrica (A)

2.2 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL

As energias renováveis são consideradas como "energias alternativas" ao modelo energético tradicional, tanto pela sua disponibilidade (presente e futura) garantida (diferente dos combustíveis fósseis que precisam de milhares de anos para a sua formação) como pelo seu menor impacto ambiental.

Grande número de tecnologias têm sido buscadas para energias “renováveis”, em geral baseadas nos benefícios ambientais (locais e globais), na distribuição natural, na geração de empregos, segurança de suprimento, etc.

O interesse pela geração de energia a partir de fontes renováveis, principalmente as alternativas (energia solar, energia eólica e biomassa) vem experimentando uma nova fase de crescimento no Brasil. Até bem pouco tempo, o apelo ambiental era o único argumento utilizado para incentivar tais fontes, não sendo, no entanto, suficiente para atingir seu objetivo. Com a crise de energia elétrica e o plano de racionamento vividos em 2001, chamou-se a atenção para um outro fator importante: a necessidade de diversificar as fontes de geração de energia. Como resultados, vêm sendo criados mecanismos legais para regulamentar o uso destas fontes, tal como a lei que cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, mais conhecido como PROINFA (PROINFA, 2006). Este programa tem entre outros o objetivo de incentivar a geração de energia elétrica a partir da energia eólica, da biomassa e de pequenas centrais hidroelétricas (SILVA *et al.*, 2005).

As fontes de geração de energia que vem ganhando um grande crescimento são: a energia solar fotovoltaica e a energia eólica.

2.2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.2.1.1 Histórico

A conversão direta de energia solar em eletricidade tem sido objeto de estudo desde o fim do século XIX. O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1890, quando Ienrich Hertz, testando a teoria eletromagnética da luz proposta por Maxwell, verificou a existência de ondas eletromagnéticas quando uma placa metálica era exposta à luz ultravioleta. Os resultados dessa experiência surpreenderam os físicos da época.

Entre as duas guerras mundiais, um esforço significativo foi empreendido em muitos países, notavelmente EUA, Alemanha, França e Inglaterra. Os materiais estudados eram principalmente o selênio e o Cu_2O . Materiais como o silício, que são de maior interesse para a conversão fotovoltaica, não existiam como monocristais de elevada pureza naquela época (PALZ, 1981).

Em 1950, foi descoberto que certos materiais denominados de semicondutores tinham a propriedade de converter em eletricidade à luz solar a que estavam expostos.

Em 1954, nos Laboratórios Bell Telephone, nos Estados Unidos, foram desenvolvidas pastilhas finas de silício que “dopadas” com certas impurezas, são cerca de 10 vezes mais eficientes na conversão de luz em eletricidade do que as substâncias até então utilizadas nas fotocélulas (MCVEIGH, 1979). Nesse mesmo ano, foi desenvolvido um processo para a purificação de monocristais de silício. Com base neste processo, não só o desenvolvimento de células solares de silício tornou-se possível, mas também um grande impulso para a tecnologia do transistor e a moderna indústria eletrônica.

A tecnologia da célula básica de silício foi aperfeiçoada progressivamente desde 1954. Em 1955, em Phoenix, no Arizona, ocorreu a primeira apresentação pública de células fotovoltaicas para a conversão de eletricidade.

Entre os anos de 1955 e 1959, as células de silício já começaram a ser comercializadas, principalmente para o mercado terrestre. A partir de 1958, quando o primeiro satélite foi lançado, o Skylab, as células de silício tornaram-se quase a fonte exclusiva de energia para os satélites. A razão do tremendo sucesso das células solares para a Astronáutica é que os conversores solares mostraram-se os de menor massa que qualquer outra fonte, considerando-se a massa de combustível (que no caso do gerador solar é zero).

Em 1974, o Congresso Norte-Americano aprovou a lei que autorizava um programa nacional de pesquisas de energia solar. A partir deste programa aumentou o interesse pela energia solar, e hoje são muitos os estudos que buscam essa fonte de energia alternativa gratuita e não poluente.

Os estudos continuaram aceleradamente, não só com o silício, mas também com outros semicondutores. Desde então, tem-se verificado uma evolução no sentido da melhoria do rendimento de conversão, tendo sido alcançado valores de até 16% para as

células de silício e superiores a 20% para as células de gálio, em condições laboratoriais. Segundo Raluy (2005), a energia fotovoltaica é a fonte de energia do futuro. Uma das razões para isto é a quantidade de energia (luz) que recebemos a cada ano do sol (RALUY *et al.*, 2005).

Atualmente, existem numerosas instalações solares na França, Japão, Rússia, Argélia, Índia, EUA, Canadá, Chile, etc. No Brasil vêm-se desenvolvendo estudos sobre o aproveitamento da energia solar em algumas universidades (UFRJ, UNICAMP, UFPB, UFCG, UFPE, UFSC, USP, UFCE).

2.2.1.2 Radiação solar

A luz solar é uma radiação eletromagnética - energia de muitos comprimentos de ondas diferentes emitida pelo Sol. Ela atravessa o espaço numa velocidade enorme de 299.274 km por segundo (velocidade da luz). Essa energia fornece a luz e o calor de que necessitamos, porém nem toda a radiação solar penetra na atmosfera. Embora a atmosfera seja muito transparente à radiação solar incidente, somente em torno de 25% penetra diretamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera, constituindo a radiação direta. Outra parte é a radiação difusa, gerada pelos efeitos da dispersão dos componentes da atmosfera. Uma superfície inclinada recebe ainda radiação refletida pelo solo ou objetos próximos.

A soma da radiação direta, difusa e refletida resulta na radiação global (Figura 2.5).

Radiação direta: é proveniente diretamente do sol, sem sofrer nenhuma mudança de direção, além da provocada pela refração atmosférica.

Radiação difusa: provém das reflexões nas massas de ar e nas nuvens. A sua potência é cerca de 10 vezes mais fraca do que a radiação direta, dependendo da opacidade das nuvens.

Radiação refletida: surge da reflexão dos raios solares em superfícies claras (neve, areia, parede, etc.). Ocorre na interface entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta.

Para a medição da radiação global o instrumento mais utilizado é o piranômetro, que registra os valores da radiação em intervalos de tempo determinados que em geral, são armazenados em valores horários ou diários.

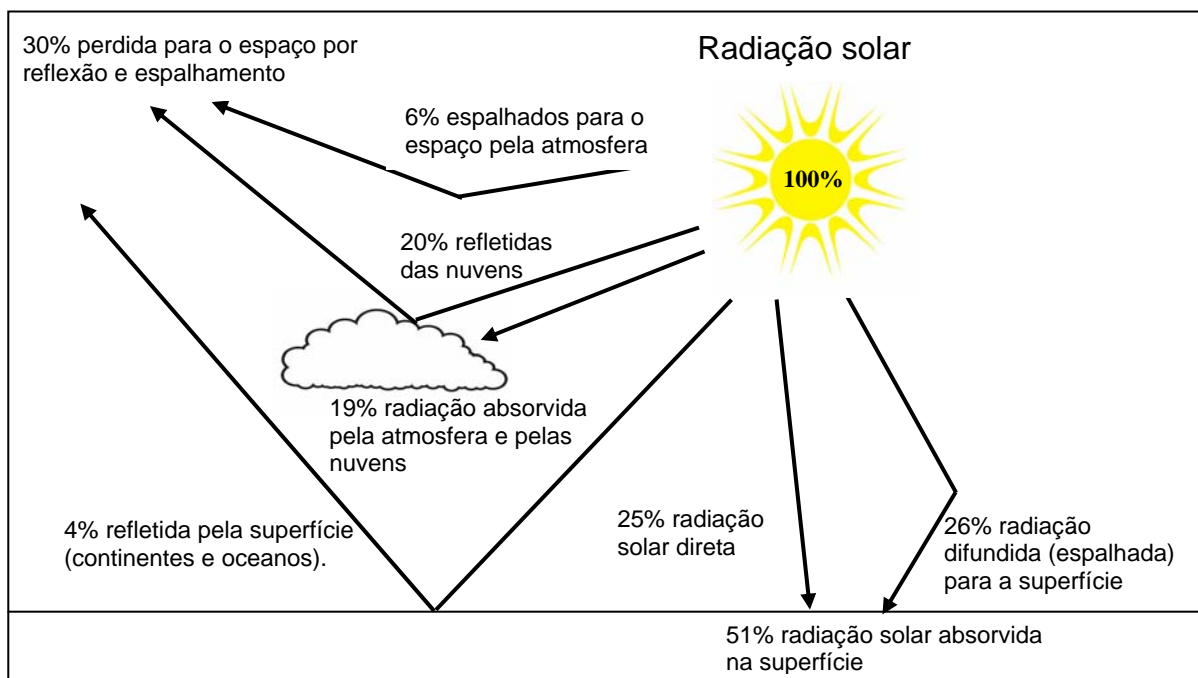


Figura 2.5: Distribuição percentual da radiação solar incidente (Adaptado de BLASQUES, 2005).

A irradiância é o termo dado à quantidade de fluxo que atravessa uma superfície por unidade de área, ou seja, potência por unidade de área (W/m^2).

A irradiação é a quantidade de energia que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo por unidade de área (Wh/m^2).

O nível de irradiância na terra atinge um total aproximado de $1000\text{W}/\text{m}^2$ ao meio-dia, em boas condições climáticas, independente da localização. Ao adicionar a quantidade total da radiação solar que incide na superfície terrestre durante o período de 1 ano, obtém-se a irradiação global anual (Wh/m^2) (ENERGIA FOTOVOLTAICA, 2004).

A Figura 2.6 mostra o mapa de potencial solar de diversas regiões do Brasil em horas de insolação por dia. Quanto maior o número médio de horas, maior será a capacidade de geração de energia (ANEEL, 2005). O Laboratório de energia Solar da

UFRGS disponibiliza um software denominado de Radiasol que calcula a radiação solar diária de algumas regiões do Brasil.



Figura 2.6: Média de insolação anual do Brasil (ANEEL, 2005).

2.2.1.3 Conversão fotovoltaica

A conversão fotovoltaica consiste na transformação direta da energia luminosa do sol em energia elétrica, utilizando captadores denominados fotocélulas (BEZERRA, 2001).

As fotocélulas constituem um campo altamente promissor do aproveitamento da energia solar, cuja viabilidade técnica já foi comprovada no suprimento de energia necessária ao funcionamento dos aparelhos elétricos e eletrônicos instalados nos engenhos espaciais lançados em órbita (PALZ, 1981).

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica se baseia na propriedade que alguns materiais (principalmente os cristais) têm, quando devidamente manuseados, de gerar uma corrente elétrica quando neles incide um feixe de luz. Estes materiais são denominados de semicondutores, que são substâncias isolantes a temperaturas muito baixas, mas condutores elétricos a temperatura ambiente (ACIOLI, 1994).

Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se os de silício monocristalino, policristalino e amorfo, o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao diseleneto de cobre e índio

(CuInSe₂ - CIS) (RODRIGUEZ, 2002 e KORONEOS *et al.*, 2005) . Neste último grupo aparecem elementos que são altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, In, Cd). O silício é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25% da crosta terrestre é silício (HAMMOND, 1992), é barato, não apresentam toxicidade (SHAH, 1992), sua eficiência está próximo de 12%, por isso vem sendo o elemento mais comercializado para a produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico (CHILDS *et al.*, 1999).

2.2.1.3.1 Silício

O Silício (Si) é matéria-prima mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro~10cm) relativamente espessas (espessura 300-400µm), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1µm) de material ativo semicondutor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm. Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a conversão de energia elétrica por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e seu baixo custo de capital (RÜTHER, 1996). Devido ao fato de que a luz solar contém relativamente pouca energia, se comparada a outras fontes energéticas, painéis solares fotovoltaicos têm de ter um baixo custo para poder produzir energia elétrica a preços competitivos.

O silício passa por uma série de processos físico-químicos até chegar a um altíssimo grau de pureza. É um elemento tetravalente, isto é, um átomo de silício possui quatro elétrons (na sua banda de valência) que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina.

Numa rede cristalina intrínseca cada átomo compartilha seus elétrons de valência em ligação covalente com outros quatro átomos de silício, completando o número ideal de oito elétrons na última camada (PRIEB, 2002). Como estes elétrons estão presos às

ligações covalentes, eles estão impossibilitados de mover-se pelo cristal e promover a condução (Figura 2.7).

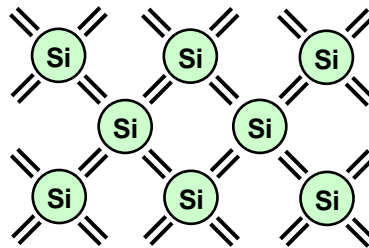


Figura 2.7: Silício tetravalente

Um semiconductor na temperatura de 0° Kelvin ($-273,15^{\circ}\text{C}$) possui uma banda preenchida por elétron, chamada banda de valência, e uma segunda, chamada banda de condução, onde nenhum elétron ocupa este estado, ou seja, todas as ligações covalentes entre átomos vizinhos estão completas. Entre a banda de valência e a banda de condução existe um espaçamento chamado gap (banda proibida) (Figura 2.8). Para que o elétron passe da banda de valência para a banda de condução é necessário uma quantidade mínima de energia, sendo esta uma constante característica de cada material. Desse deslocamento, dois tipos de portadores de carga são formados: o elétron agora localizado na banda de condução e uma lacuna (positiva), onde o elétron se localizava na banda de valência. Como apenas a banda de valência está preenchida, não há condução de corrente elétrica. Aumentando-se a temperatura, acima de 0° K ($-273,15^{\circ}\text{C}$), de um material semiconductor, com largura do gap, alguns poucos elétrons da banda de valência adquirem energia térmica da rede e poderão pular dos seus estados da banda de valência para estados vazios da banda de condução. Desta forma, passa-se a uma condição em que os elétrons, tanto da banda de valência (banda não mais totalmente preenchida) como da banda de condução (apenas parcialmente preenchida), podem conduzir corrente elétrica. A condutividade será, no entanto, bem reduzida, tendo em vista o número reduzido de elétrons na banda de condução, bem como uma banda de valência ainda quase preenchida (CALLISTER, 2002).

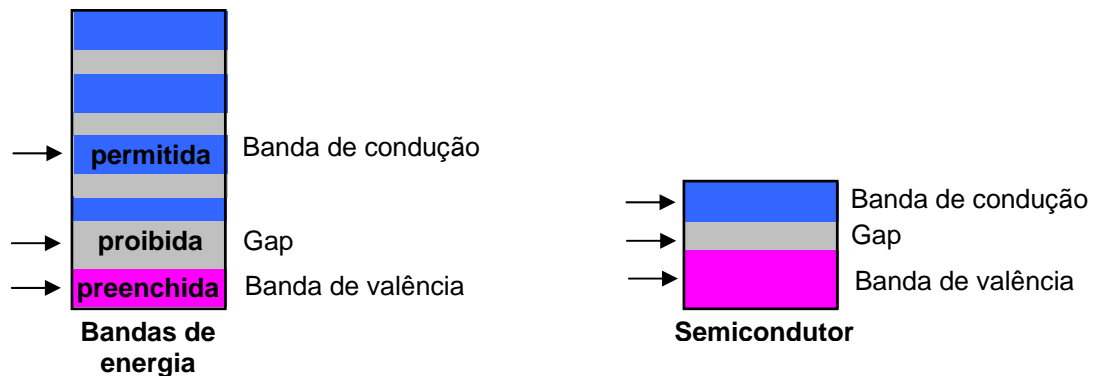


Figura 2.8: Bandas de energia de um material não semicondutor e de um material semicondutor

Quando estes semicondutores são submetidos à ação de um feixe luminoso, liberam elétrons, produzindo uma corrente contínua. Ao liberar os elétrons, os lugares por eles ocupados na rede do cristal recebem o nome de vazios, aos quais se atribui simbolicamente uma carga positiva. O deslocamento dos elétrons na rede do cristal se faz até que eles se combinem com os átomos incompletos e preenchendo assim os vazios. Nos cristais puros denominados de semicondutores intrínsecos, os elétrons e os vazios são em igual número e, portanto, as recombinações são frequentes dando origem a uma fraca condutibilidade.

Para melhorar a condutibilidade é feita uma dopagem, ou seja, são introduzidas no cristal pequenas quantidades de impurezas constituídas por átomos que possuam um número de elétrons de valência diferente do cristal, fazendo com que os elétrons circulem mais livremente. Esses semicondutores são denominados de extrínsecos, devido o comportamento elétrico ser determinado pelas impurezas, as quais, mesmo em pequenas concentrações introduzem um excesso de elétrons ou de buracos.

Quando o Si é dopado com uma pequena fração de átomos pentavalentes (exemplo: antimônio, fósforo e arsênio) que substituem poucos átomos da rede cristalina de Si, formando ligações covalentes, fica o quinto elétron sem com quem formar uma ligação (elétron livre extra). O semicondutor dopado com átomos pentavalentes (apresenta excesso de elétrons) são chamados de doadores e o cristal dopado passa a ser chamado tipo n por ter a predominância de carga negativa.

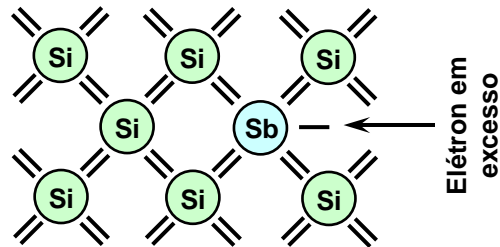


Figura 2.9: Silício dopado com átomo pentavalente

Quando o Si é dopado de átomos trivalentes (exemplo: alumínio, boro e gálio), cada átomo de impureza absorve um elétron, ou seja, são completadas apenas três ligações covalentes com os átomos de Si, deixando uma lacuna, ou uma ausência de elétron na 4ª ligação, que pode se deslocar entre as posições de ligação atômicas. O semiconductor dopado com átomos trivalentes (apresenta excesso de vazios) é chamado de receptor e o cristal passa a ser chamado tipo p, pois nele tem-se a predominância de portadores de carga positiva.

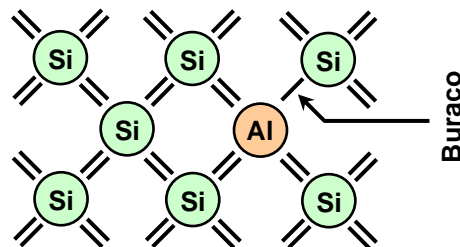


Figura 2.10: Silício dopado com átomo trivalente

2.2.1.3.2 Junção p-n

O efeito fotovoltaico ocorre quando materiais semicondutores que possuem 2 regiões distintas eletricamente, uma tipo n e outra do tipo p, são expostos à luz (Figura 2.11). Entre estas duas regiões forma-se uma junção p-n, na qual ocorre uma difusão de elétrons da região n para a região p e uma difusão de lacunas da região p para a região n, devido aos fortes gradientes de concentração de cargas elétrica. Em consequência desta difusão é gerado um campo elétrico interno no material, o qual origina uma força elétrica que se opõe à força de difusão original. Quando estas forças estão em equilíbrio,

a corrente através da interface das 2 regiões é nula, mas quando a junção p-n é iluminada (for exposta a fótons) se estabelece um desequilíbrio nas correntes da junção ocasionando uma diferença de potencial elétrico entre os dois lados da junção p-n. Se, em cada lado da junção, forem conectados terminais de ligação e estes ligados através de um condutor, aparecerá uma corrente elétrica, denominada de fotocorrente, que perdurará enquanto a junção p-n mantiver-se iluminada (GREEN, 2002).

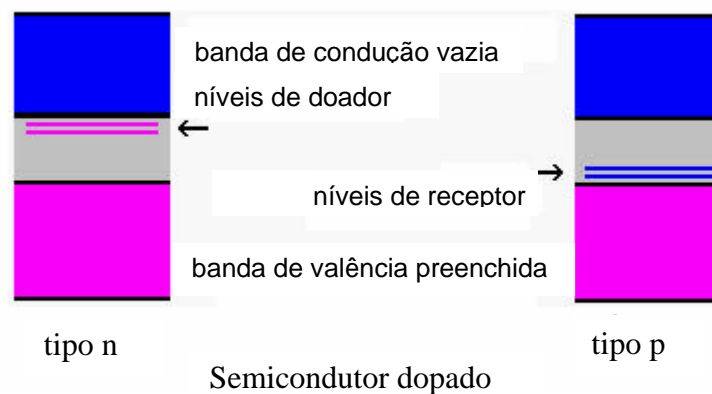


Figura 2.11: Bandas de condução

A Figura 2.12 e a Figura 2.13 apresentam a estrutura de uma célula fotovoltaica e a configuração da célula solar.

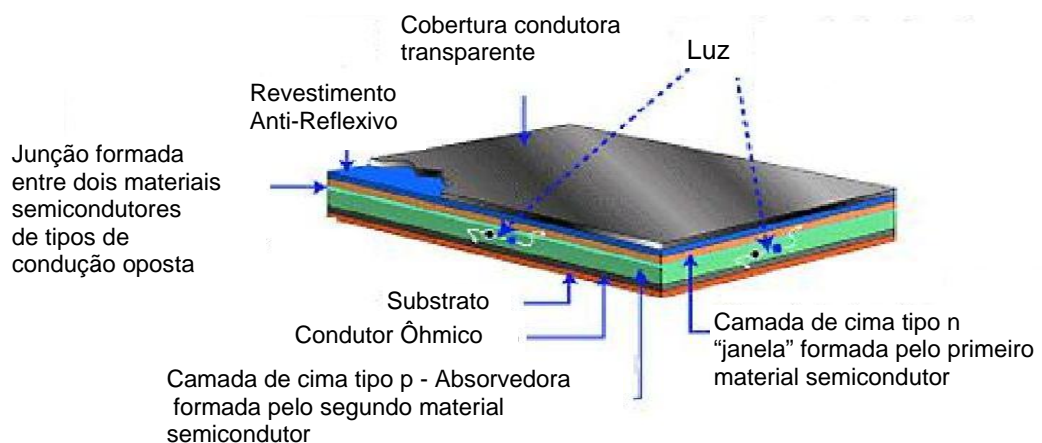


Figura 2.12: Célula fotovoltaica

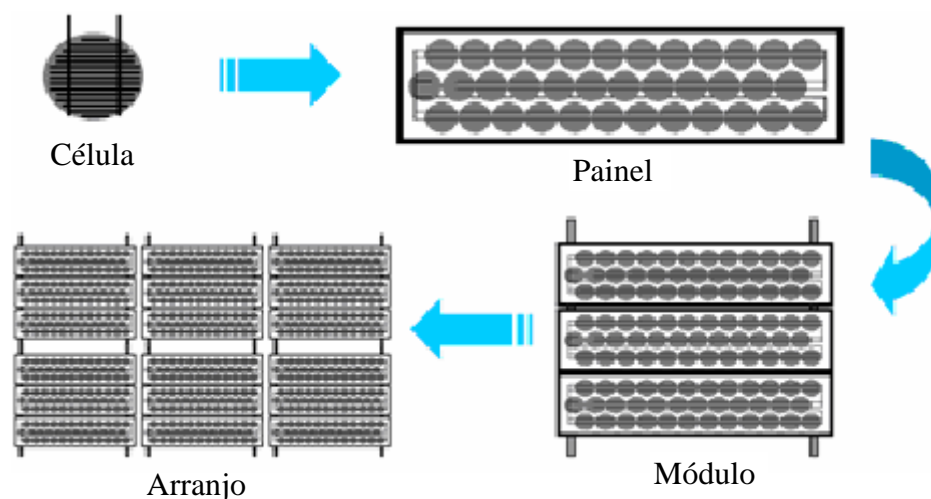


Figura 2.13: Configuração da célula solar

2.2.1.5 Módulo fotovoltaico

É a unidade básica de todo sistema de geração de eletricidade fotovoltaica. A ABNT (NBR 10899/TB-328) define o módulo fotovoltaico como sendo o “menor conjunto ambientalmente protegido de células solares interligadas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua”. Módulos com tensão nominal de 12 V_{DC} são constituídos por 30 a 36 células em série. O módulo é composto de células conectadas em arranjos que produzem tensões e correntes suficientes para o aproveitamento prático da energia já que cada célula tem (15x15 cm²) só pode fornecer cerca de 1,0 -1,5 W com tensão de 0,5 V. Os módulos, assim como as células em um módulo, podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo, dependendo da potência e tensão desejadas.

O gerador fotovoltaico é constituído por um conjunto de módulos unidos eletricamente entre si. Normalmente se constrói associando primeiro módulos em série, até conseguir a tensão desejada, e depois associando em paralelo várias associações em série até obter o nível de corrente pretendido. O comportamento elétrico do gerador fotovoltaico é correspondente a de um gerador de corrente contínua, cujas características instantâneas de corrente e tensão variam com a intensidade da luz e com a temperatura.

É habitual caracterizar o tamanho do gerador fotovoltaico por sua potência nominal nas condições padrão de medida, expressa em kWp.

- **Tensão de circuito aberto e corrente de circuito aberto**

Quando um módulo está posicionado na direção do sol, a tensão pode ser medida entre os terminais positivos e negativos de um voltímetro. Se não houver, ainda, nenhuma conexão de qualquer equipamento ao módulo, a corrente não flui; então esta é denominada de tensão de circuito aberto (V_{ca}).

A corrente deve ser medida por um amperímetro; e ainda sem as conexões de qualquer equipamento, se ligar os terminais de um módulo diretamente, haverá uma corrente fluindo, a qual será denominada de corrente de curto-circuito (I_{cc}); neste caso a tensão é zero.

- **Arranjo dos módulos**

Os módulos, assim como as células em um módulo, podem ser conectadas em ligações série e/ou paralelo, dependendo da potência e tensão desejadas.

A conexão em série dos dispositivos fotovoltaicos (Figura 2.14) é feita de um terminal positivo de um módulo a um terminal negativo de outro, e assim por diante.

Quando a ligação está em série (isto é idêntico para células, módulos e painéis) as voltagens são adicionadas e a corrente não é afetada, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad 2.24$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad 2.25$$

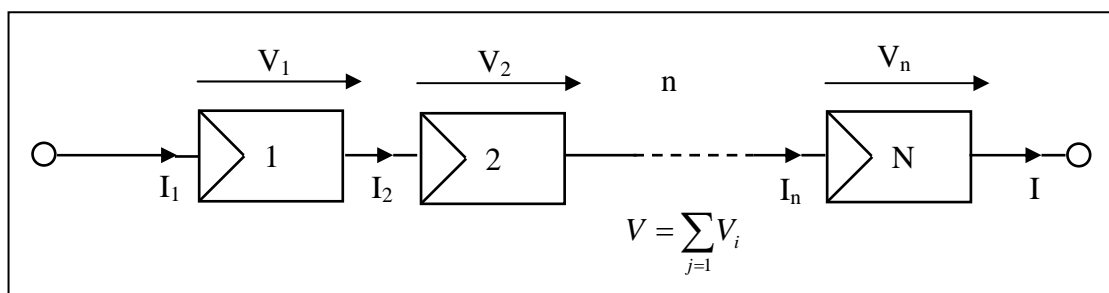


Figura 2.14: Arranjo das células em série

Ao assumir-se as correntes individuais iguais, significa considerar-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de “bypass” (Figura 2.15). Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em grupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula (ENERGIA FOTOVOLTAICA, 2004)

Um outro problema que pode acontecer é quando surge uma corrente negativa fluindo pelas células, ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria (ENERGIA FOTOVOLTAICA, 2004) (Figura 2.16).

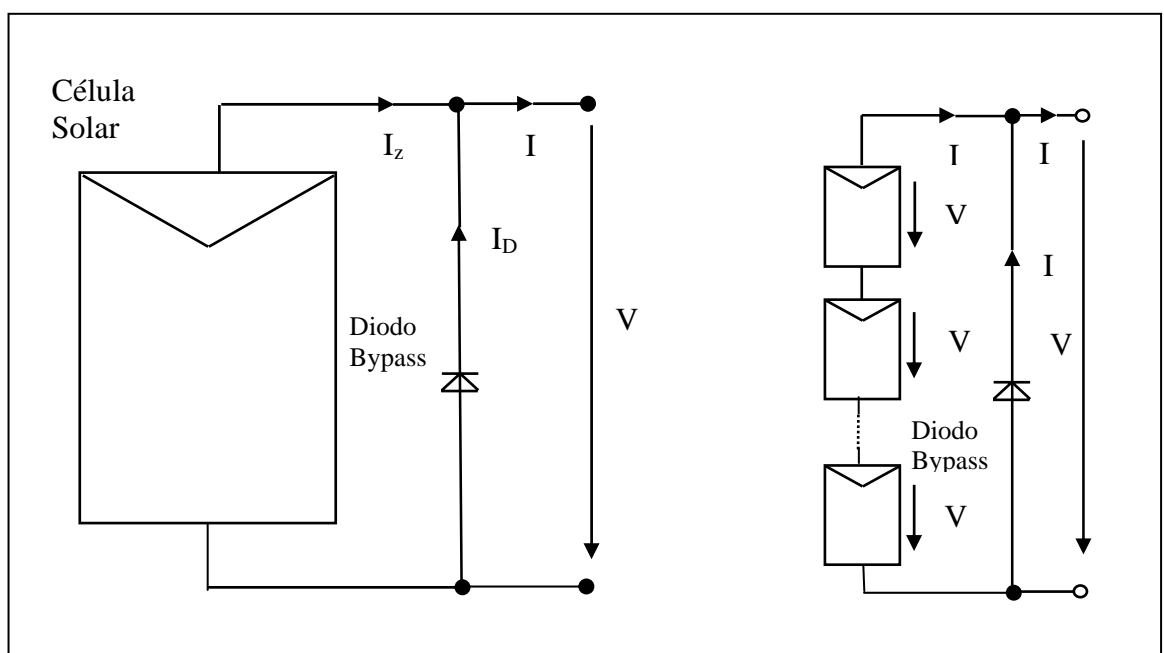


Figura 2.15: Possível ligação para um diodo bypass entre células

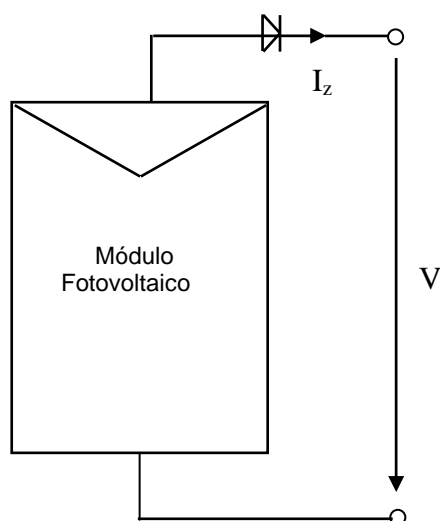


Figura 2.16: Diodo de bloqueio

Dispositivos conectados em paralelo compreendem ligações de terminais positivos juntos e terminais negativos juntos.

A conexão em paralelo causa adição das correntes enquanto que a tensão continua a mesma (Figura 2.17):

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad 2.26$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad 2.27$$

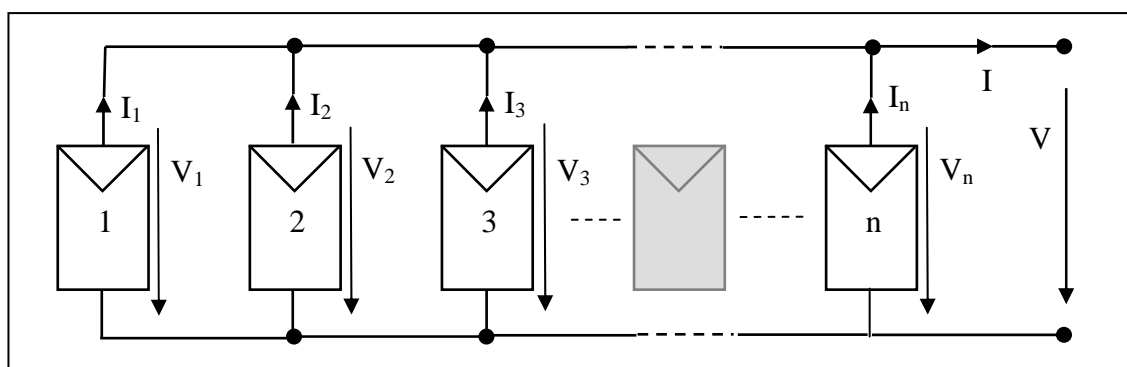


Figura 2.17: Conexão de células em paralelo

Assumindo que as tensões individuais sejam iguais, significam considerar-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

Para proteger o painel dos possíveis agentes externos (danos e condições climáticas) é necessário revesti-los com alguns elementos, como:

- Cobertura exterior de vidro: tem como função principal proteger as células e deve facilitar ao máximo a transmissão da irradiação solar. Caracterizam-se por sua resistência, alta transmissividade e baixo conteúdo em ferro.
- Encapsulante: material disposto diretamente sobre as células, normalmente um polímero termoplástico transparente, eletricamente isolante e resistente à umidade e à fadiga mecânica. É importante que não seja afetado em sua transparência pela contínua exposição ao sol, buscando-se ademais um índice de refração semelhante ao do vidro protetor para não alterar as condições de irradiação incidente. O material mais utilizado é o EVA (etileno-acetato de vinila).
- Lâmina ou cobertura posterior: protege a célula dos agentes meteorológicos. Usualmente se empregam lâminas formadas por distintas chapas de materiais, de diferentes características. O material mais comumente empregado é o PVF (polifluoreto de vinila), comercialmente conhecido por Tedlar, embora exista módulo que utilizem um segundo vidro.
- Moldura metálica: Marco metálico de alumínio ou aço inoxidável, que assegure uma suficiente rigidez ao conjunto, incorporando os elementos de captação e proteção a estrutura exterior do painel.
- Fiação e bornes de conexão habituais nas instalações elétricas, protegidas da intempérie por coberturas de materiais isolante.
- Diodo de proteção contra sobrecargas ou outras alterações de funcionamento do painel.

O espaçamento entre a moldura e o conjunto laminado é preenchido por um perfil de borracha de silicone, a qual também é empregada na fixação da caixa de bornes à cobertura posterior.

Outro detalhe importante na fabricação dos módulos é o formato das células. A cristalização do silício é feita de modo que as células apresentam formato cilíndricos, porém o ideal é que elas ocupem a maior área possível do módulo. Para diminuir perdas

no processo, são usualmente realizados pequenos cortes de modo que a célula redonda se assemelhe a um octógono.

Na Figura 2.18 é apresentado o corte de um módulo fotovoltaico, mostrando seus principais componentes.

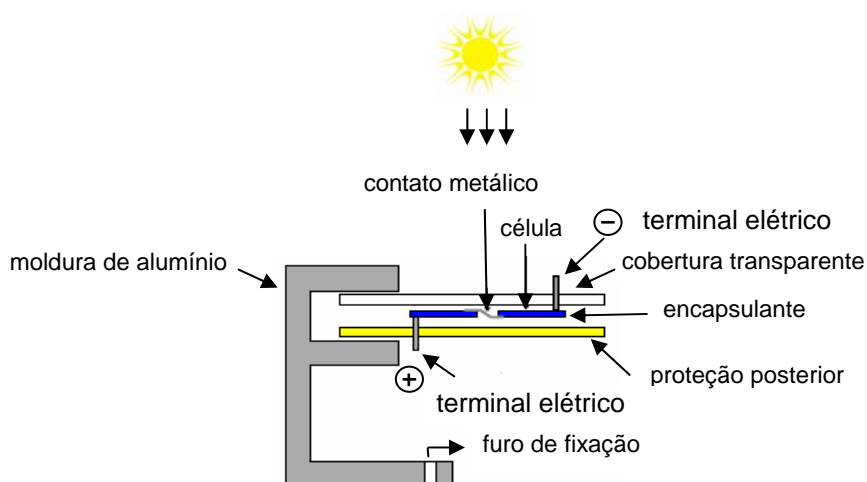


Figura 2.18: Estrutura de um painel fotovoltaico

2.2.1.6 Armazenamento de energia (Acumuladores/baterias)

Nas instalações fotovoltaicas pode-se utilizar a energia captada pelos painéis diretamente, que é a forma de melhor aproveitamento desta energia. Mas, desta forma, tem-se que a energia fornecida é variável de acordo com a hora do dia (potencial de insolação), nebulosidade, clima, etc (IDAE, 1995). Sabe-se também que o período de aproveitamento da energia direta é curto, sendo em torno de 6 horas por dia.

Assim, nas instalações fotovoltaicas, o meio mais habitual é armazenar a energia em baterias durante as horas de irradiação disponível, para sua utilização posterior nos momentos de insolação baixa ou nula.

As baterias mais usadas para armazenar a energia nos sistemas fotovoltaicos (FV) são as baterias de chumbo-ácido. Estas baterias tem a melhor relação preço-eficiência, e podem assegurar levadas e reduzidas correntes de carga com uma boa eficiência. Apesar destas baterias utilizarem um elemento muito tóxico, o chumbo, possui um elevado grau de reciclagem, minimizando os impactos no ambiental. Na Europa Continental, as baterias de chumbo são 95% recicláveis (ENERGIA FOTOVOLTAICA, 2004).

Quando se escolhe uma bateria para um sistema FV deverão observar além da tensão nominal alguns fatores, como (MONTEIRO, 1996):

- temperaturas admissíveis (-15 °C até +50 °C);
- taxa de auto-descarga (2 % por mês a 25 °C);
- tempo de vida (1800 ciclos com 80% de profundidade de descarga);
- capacidade para descargas de 10h;
- frequência requerida para restabelecer os níveis de eletrólito;
- peso, resistência à sobrecarga e custo.

2.2.1.7 Controlador/regulador de carga

A função principal dos reguladores de carga em sistemas FV (fotovoltaico) isolados é a de manter a bateria no seu estado máximo de carga enquanto a protege das sobrecargas originadas pelos módulos FV e das descargas originadas pelas cargas.

No caso de sobrecarga, inicia-se na bateria processo de gaseificação (hidrólise da água em hidrogênio e oxigênio) ou de aquecimento, que podem chegar a ser perigoso e, em qualquer caso, prejudicaria a vida útil da bateria. No caso de descarga em excesso, este fenômeno pode provocar uma sensível diminuição na vida útil da bateria em sucessivos ciclos.

Para proteger as baterias de descarregarem totalmente, a maioria dos reguladores de carga inclui uma característica opcional para desligar as cargas do sistema quando a bateria alcança uma tensão baixa ou um estado baixo da condição da carga.

A maioria de reguladores da carga tem uma luz de indicador ou um alarme audível para alertar o utilizador/operador da necessidade de ter que desligar as cargas da bateria. Uma vez que a bateria seja recarregada até um determinado nível, as cargas podem novamente ser ligadas à bateria.

2.2.1.8 Inversor/conversor

Os inversores são responsáveis pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA).

Em determinadas aplicações que trabalham em corrente contínua, não é possível fazer coincidir as tensões proporcionadas pelo acumulador com a solicitada por todos os elementos de consumo. Eles usam um mecanismo de chaveamento (dispositivo que se chama de comutador cujo papel é o de “quebrar” a corrente contínua em pulsos) para alterar o fluxo de corrente na carga entre as direções positiva e negativa.

Como os painéis fotovoltaicos, as baterias trabalham em corrente contínua, então não faz necessária a presença de um inversor. Mas, caso deseje utilizar a energia fotovoltaica para equipamentos que utilizam corrente alternada é necessário utilizar o inversor para adaptar a corrente de alimentação com a corrente utilizada no equipamento.

Um inversor caracteriza-se principalmente pela tensão de entrada, que deve se adaptar à do gerador, à potência máxima que pode proporcionar e à eficiência. Esta última é definida como a potência elétrica que o inversor entrega à carga (potência de saída) e a potência elétrica que extrai do gerador (potência de entrada).

A eficiência do inversor varia em função da potência consumida pela carga. É necessário conhecer essa variação, sobretudo se a carga em corrente alternada é variável, a fim de que o ponto de trabalho do equipamento se ajuste o melhor possível a um valor médio especificado. Pode-se considerar a eficiência de 70% da carga como um parâmetro aceitável de eficiência do inversor. Porém, na atualidade, a eficiência dos inversores é da ordem de 90% (CERAGIOLLI, 1997).

Outros aspectos que devem possuir os inversores são:

- Possuir uma eficiência alta, pois em caso contrário se terá de aumentar desnecessariamente o número de painéis para alimentar a carga.
- Está adequadamente protegido contra curtos-circuitos e sobrecargas.
- Admitir demandas instantâneas de potências maiores do que 200% de sua potência máxima.

Em qualquer caso, a escolha do inversor a utilizar deve realizar-se em função das características da carga. Em função desta última se poderá necessitar de equipamentos mais ou menos complexos.

2.2.1.9 Maximum Power Point Tracking (Seguidor do ponto de máxima potência) – MPPT

Experimentalmente, as células fotovoltaicas (FV) apresentam grandes variações de potência elétrica em função das condições meteorológicas. Para garantir um máximo de eficiência faz-se uso do Seguidor de Máxima Potência, que é um dispositivo que opera para regular a tensão e a corrente de operação do arranjo fotovoltaico, obtendo o máximo produto I-V. O MPPT é o ponto da curva característica onde a célula solar funciona à máxima potência (Figura 2.19). Para este ponto estão especificada a potência P_{MPPT} , a corrente I_{MPPT} e a tensão V_{MPPT} (GARCIA, 2004).

A operação do gerador fotovoltaico para levar ao seu ponto de potência máxima (MPPT) implica igualar a impedância da carga com a do gerador. Para isto, um dispositivo eletrônico (normalmente um conversor DC-DC) capaz de executar a função do seguidor de potência máxima, tem de ser conectado entre o painel solar e a carga, ou incluindo no circuito do inversor. A localização de um MPPT dentro de um sistema fotovoltaico depende se as cargas forem CC ou CA (NETO, 2005).

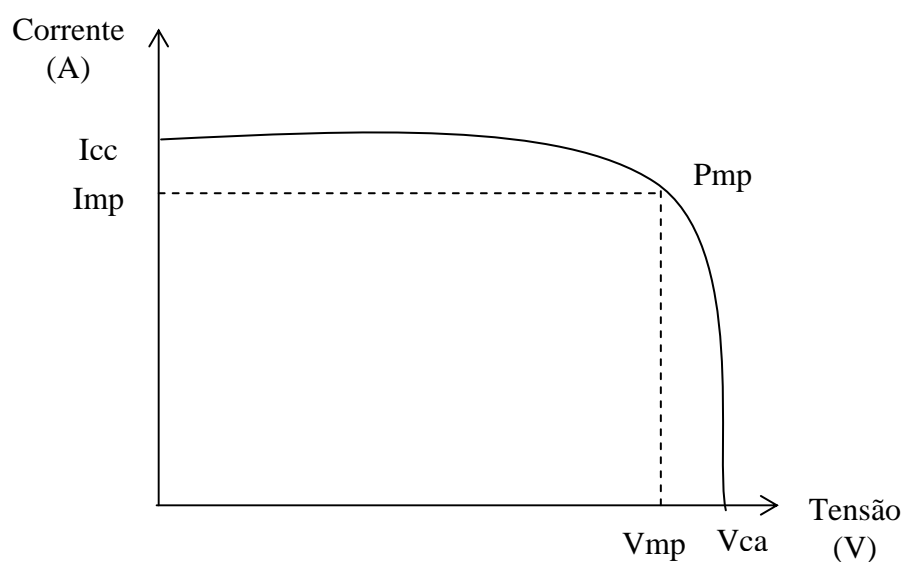


Figura 2.19: Curva Corrente x Tensão

Os valores transcendentais desta curva são:

- Corrente de curto-circuito (I_{cc}): Máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a tensão nula e consequentemente potência nula.

- Tensão de circuito aberto (V_{ca}): Máxima tensão que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a circulação de condições determinadas de radiação e temperatura a circulação de corrente nula e consequentemente a potência nula.

- Potência Pico (P_{mp}): é o valor máximo de potência que pode entregar o dispositivo. Corresponde ao ponto da curva no qual o produto $V \times I$ é máximo.

- Corrente a máxima potência (I_{mp}): corrente que entrega o dispositivo a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo.

- Tensão a máxima potência (V_{mp}): tensão que entrega o dispositivo a potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como tensão nominal do mesmo.

2.2.1.10 Sistemas fotovoltaicos autônomos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados à rede elétrica. A utilização de cada uma dessas opções vai depender do tipo de aplicação e da disponibilidade de recursos energéticos. Os sistemas fotovoltaicos autônomos são sistemas que não estão conectados à rede elétrica, mas podem ou não apresentar fontes de energia complementar à geração fotovoltaica.

Quando o sistema não se restringe somente à geração fotovoltaica, diz-se que o sistema é híbrido. Quando o sistema não é interligado a rede elétrica comercial, puramente fotovoltaico, ele é denominado de sistema isolado.

Sistemas fotovoltaicos autônomos, híbridos ou isolados, em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento. Este armazenamento pode ser feito por meio de baterias, energia potencial gravitacional (sistemas de bombeamento de água), produção de hidrogênio, ar comprimido, etc.

Além deste armazenamento, os sistemas autônomos híbridos necessitam de um controle que integre os vários geradores de forma a otimizar a operação. Existem várias configurações possíveis, assim como estratégias de uso de cada fonte de energia.

2.2.1.11 Configurações básicas

Os sistemas fotovoltaicos autônomos possuem configurações específicas que variam muito dependendo da sua utilização. Essas configurações podem ser classificadas levando-se em conta o tipo de carga a ser alimentada e se o sistema necessita de armazenamento (SANDIA NATIONAL LABORATORIES, 1991).

Tomando estas definições, os sistemas fotovoltaicos autônomos dividem-se em:

- Sistemas com carga CC (corrente contínua) sem armazenamento
- Sistemas com carga CC com armazenamento
- Sistemas com carga CA (corrente alternada) sem armazenamento
- Sistemas com carga CA com armazenamento

2.2.1.11.1 Sistemas com carga CC sem armazenamento

Neste tipo de configuração a energia elétrica é usada no momento da conversão por efeito fotovoltaico em equipamentos que operam em corrente contínua. Geralmente, estes sistemas são utilizados no caso de bombeamento da água com motor de corrente contínua. Às vezes, os sistemas podem ter também dispositivos específicos para otimizar o funcionamento da bomba (MPPT). Este é o sistema mais simples e de menor custo. A Figura 2.20 mostra um esquema de blocos deste tipo de configuração.

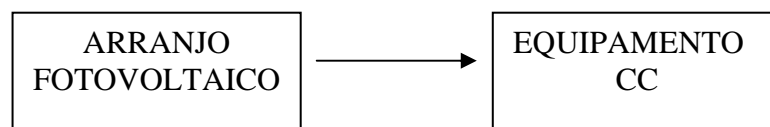


Figura 2.20: Sistema fotovoltaico com carga CC sem armazenamento

2.2.1.11.2 Sistemas com carga CC com armazenamento

Este é o caso em que se deseja usar em equipamentos elétricos, em corrente contínua, mesmo durante o período em que não está havendo conversão fotovoltaica. Para que isso ocorra é necessário que se armazene a energia em baterias. Exemplos comuns são iluminação, televisão, sistemas de comunicação, etc.

O uso de um controlador de carga é necessário de forma a proteger as baterias contra danos devido a sobrecargas e descargas profundas. Na Figura 2.21 tem-se este tipo de configuração.

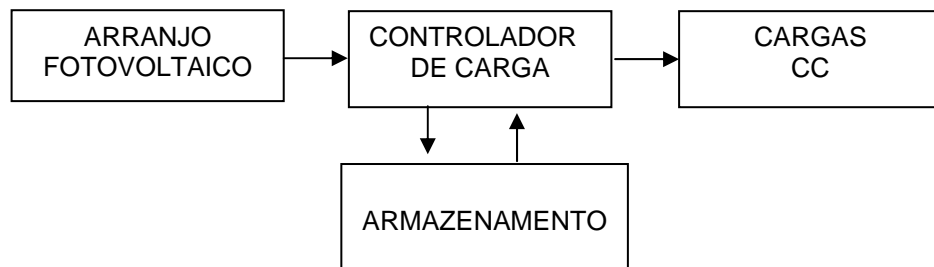


Figura 2.21: Sistema fotovoltaico com carga CC com armazenamento

2.2.1.11.3 Sistemas com carga CA sem armazenamento

Quando um sistema sem armazenamento usa equipamentos que operem em CA, é necessário introduzir um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser utilizado. No próprio inversor pode ser incluído um MPPT. Um sistema de bombeamento alimentado com CA pode ser usado como exemplo. A Figura 2.22 mostra esta configuração por meio de blocos funcionais.



Figura 2.22: Sistema fotovoltaico com carga CA sem armazenamento.

2.2.1.11.4 Sistemas com carga CA com armazenamento

Esta configuração é utilizada para alimentação de equipamentos que operem em corrente alternada, portanto necessitam de controlador de carga, armazenamento e um inversor. Este tipo de sistema utiliza um MPPT, que pode ser incluído no próprio inversor. Um exemplo comum deste tipo de configuração é no atendimento a residências isoladas, em que existam eletrodomésticos convencionais (CA) (Figura 2.23).

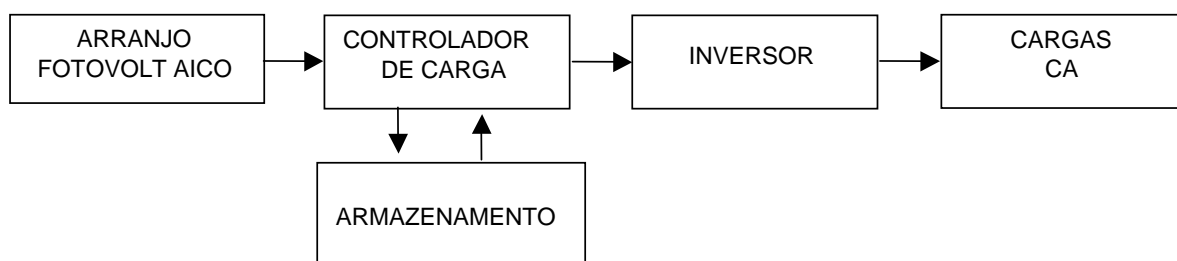


Figura 2.23: Sistema fotovoltaico com carga CA com armazenamento.

2.2.1.12 Sistema de conversão fotovoltaica

O sistema de conversão fotovoltaica engloba todo o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e outros equipamentos convencionais, que transformam ou armazenam a energia elétrica para esta ser utilizada na aplicação final. Este sistema resume-se basicamente a quatro blocos: o módulo fotovoltaico, o controlador de carga, o inversor, as baterias como bloco de armazenamento, outros equipamentos, como fiação, diodos de proteção, sistemas de consumo da energia obtida (cargas) (Figura 2.24).

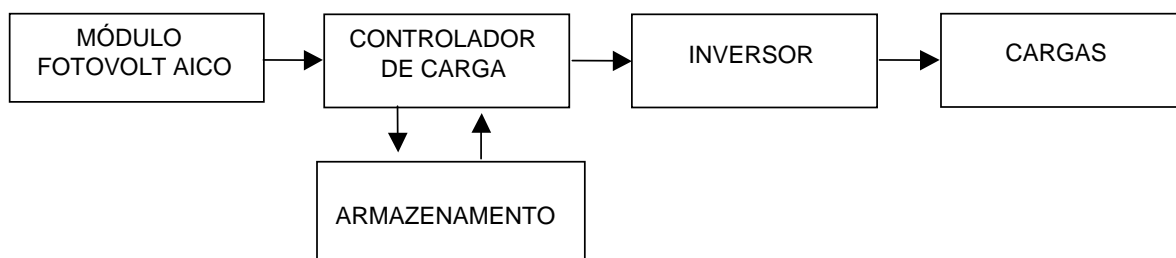


Figura 2.24: Sistema fotovoltaico básico em blocos.

2.2.1.13 Vantagens das células solares fotovoltaicas

As células solares fotovoltaicas apresentam uma série de vantagens que vem fazendo com que a sua procura cresça cada vez mais. Entre estas, pode-se citar: funcionamento silencioso, simples e confiável; fonte renovável de energia elétrica; maior potência por unidade de área (ou seja, quanto maior a área do painel fotovoltaico mais potência será obtida); instalação simples; compacto e potente; construção reforçada e duradoura; não possui partes móveis que podem se desgastar, sistema de baixa manutenção, sistema modular leve; compatível com qualquer bateria; grande vida útil (em torno de 20 anos); energia solar como combustível; converte energia mesmo em dias nublados; fornecem tensões de 12, 24, 36 e 48 volts (corrente contínua), dependendo da necessidade; tem fácil manuseio e transporte, podendo ser ampliado conforme sua necessidade; oferece baixo impacto ambiental, etc.

2.2.1.14 Aplicações da energia fotovoltaica

As fotocélulas possuem os mais diversos empregos, tanto no campo espacial quanto no campo terrestre.

No campo espacial possuem aplicação na geração de eletricidade para equipamentos lançados ao espaço (nos satélites).

No campo terrestre estas aplicações podem, a grosso modo, ser divididas em duas categorias:

- produtos de consumo;
- sistemas autônomos.

Na categoria de produtos de consumo estão incluídas as calculadoras, relógios, brinquedos, pequenos carregadores de baterias, televisores portáteis e aparelhos de uso doméstico (alarmes, iluminação, etc.).

Os sistemas autônomos também abarcam uma vasta gama de aplicações, tanto rurais como urbanas, tais como: uso em residências, sistemas comerciais e agrícolas que não estejam conectados com a rede elétrica. Dentro desta categoria, as aplicações mais comuns são para: telecomunicações, bombeamento de água para consumo ou irrigação, sensoriamento remoto, sinalizações (bóias, faróis, linhas de trem, etc.), cerca elétrica,

iluminação pública, alimentação elétrica de residências ou postos de saúde, sistemas de dessalinização, entre outros (LEÃO *et al.*, 2001).

2.3 ESTADO DA ARTE

2.3.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO NO MUNDO

O uso de fonte renovável de energia nos sistemas de dessalinização iniciou com a crise do petróleo em 1970 (BELLESSIOTIS *et al.*, 2000). Os estudos continuam e vêm sendo realizados com o intuito de investigar a viabilidade técnico-econômica do sistema de dessalinização com energia renovável, para serem utilizados principalmente em áreas remotas.

Os sistemas fotovoltaicos que vêm sendo utilizados na dessalinização de águas buscam adquirir um menor custo para a sua instalação, de forma a tornar-se competitiva com a energia elétrica convencional. Para locais muito distantes das cidades, desprovidos de energia elétrica convencional, o custo da utilização de energia fotovoltaica já é competitivo com a energia elétrica convencional, devido à distância do local para chegar com toda a fiação elétrica. E a utilização dessa energia poderá ter outras finalidades além do sistema de dessalinização.

Na atualidade, a potência instalada dos sistemas fotovoltaicos encontra-se em rápido crescimento na Europa, Japão e Estados Unidos, basicamente devido à expansão das instalações residenciais interligadas na rede.

Algumas experiências de sistemas de dessalinização via OI usando energia fotovoltaica já existem:

Ahmad (2002) fez um estudo em regiões desertas do Egito, nas quais o índice de insolação é alto e água potável é escassa. Foi montado um sistema solar fotovoltaico em plantas de dessalinização via OI no Departamento Nacional de Energia Solar, do Centro Nacional de Pesquisa, no Cairo. A água salobra tem uma salinidade de 2.000 mg/L. O sistema é composto por uma membrana de OI, um motor de 0,5 HP, um banco de baterias (12 V, 500 Ah), um controlador de carga (24 V, 40 A), um inversor (24 V, 200 V), 22 painéis fotovoltaicos (de 50 W cada um). O sistema foi desenvolvido para operar durante 6 h diárias. A produção de água potável é de 0,1425 m³/h com uma recuperação de 50%. Assumindo que o sistema opera 300 dias/ano, considerando a vida

útil dos painéis de 20 anos, foi desenvolvido um balanço de custo no qual o preço de $1 \text{ m}^3 = \text{R\$ } 9,32$, custo considerado elevado.

Suleimani *et al.* (2000) desenvolveram uma pesquisa para o Ministério de Recursos Hídricos de Omã. O objetivo foi montar um sistema de dessalinização via OI usando energia fotovoltaica numa região deserta de Omã. A água de poço tinha uma alta concentração de sais, como também sulfeto de hidrogênio e fluoreto. O sistema era constituído por 3 membranas de OI em série, 2 motor-bomba, um sistema de pré-tratamento, 64 painéis fotovoltaicos (53 W cada), um banco de baterias (200 Ah), um controlador de carga de 48 Vdc e um inversor. Uma estimativa de custo foi feita, onde se comparou o sistema operando com os painéis fotovoltaicos e com um gerador a óleo diesel. Para a mesma produção de água ($6,5 \text{ m}^3/\text{d}$) o custo da água permeada foi inferior com o uso do sistema solar. Portanto, para esta planta, o uso dos painéis é mais viável do que com o óleo diesel.

Abdallaha *et al.* (2005) instalou um sistema experimental para investigar o desempenho de uma planta de dessalinização usando sistema de energia fotovoltaica no Centro de Energia Renovável de Ciência Aplicada na Universidade em Amma, na Jordânia. De acordo com a análise de qualidade da água salobra fornecida pela Agência Internacional de Cooperação Japonesa (JICA), o total de sólidos dissolvidos varia de 5000 - 10.000 mg/L. O sistema desenvolvido é constituído de uma membrana de OI, dois painéis fotovoltaicos, baterias, controlador de carga, inversor, motor-bomba e um sistema de pré-tratamento. O desempenho do sistema depende de alguns fatores, principalmente das condições meteorológicas, como a radiação solar. O sistema fotovoltaico aciona o motor-bomba que é ligado à planta de dessalinização. A tensão, a corrente e a potência são, respectivamente, 17,9 V, 2,1 A e 35 W. O TDS (total de sólidos dissolvidos) da água de alimentação utilizado no experimento foi de 400 mg/L e o pH 7.2. Após a dessalinização, a água potável produzida passou a ter um TDS de 20 mg/L e o pH de 7.9. Os resultados mostraram a corrente elétrica e a voltagem variam de acordo com a hora do dia, mas os valores máximos são obtidos entre as 10h30min e 15h30min, a partir dessa hora, há um decréscimo, afetando conseqüentemente o sistema de dessalinização, onde há uma diminuição na produção do permeado. O fluxo máximo de permeado obtido foi de 10,8 L/h às 12h30min. Para um melhor resultado desse

sistema de dessalinização, deveria realizar experimentos com concentrações próximas das encontradas na região.

Bouguech (2004) desenvolveu um sistema de dessalinização via OI usando painéis FV, numa região da Tunísia. De acordo com as estatísticas da Autoridade Nacional de Água mais de 51% dos recursos de água disponível têm uma salinidade que varia entre 1.500 e 3.000 mg/L. Como o país possui uma energia média disponível de 5 kWh/m²/d e a qualidade da água não é apropriada para o consumo humano, houve um grande interesse de instalar o sistema. O sistema experimental é composto pelo sistema de energia (FV), pré-tratamento (filtro de carvão ativado e filtro de cartucho), sistema de dessalinização (uma membrana em espiral de polyamida) e pós-tratamento. O sistema operou numa pressão de 5 bar e a produção de permeado foi de 1,2 L/h. Produção muito baixa, já que a capacidade nominal de produção da membrana é de 50 L/d. Os resultados mostraram que o desempenho dos painéis fotovoltaicos é maior entre 11h30 e 14h30, já que a oferta de sol é maior.

Na Austrália, em muitas regiões remotas, a população consome água de poço com concentração de sais variando de 1.500 a 5.000 mg/L. Um pequeno sistema de dessalinização foi desenvolvido usando painéis fotovoltaicos para obter água potável. O sistema de dessalinização utilizado é baseado num sistema híbrido de membranas (NF e OI) e um pré-tratamento com membrana de UF. A energia utilizada no motor-bomba é proveniente dos painéis fotovoltaicos. A escolha das membranas de NF ou de OI depende da qualidade da água de alimentação e espera-se influenciar o consumo de potência devido às exigências de diferentes pressões. O sistema foi testado com dois tipos de águas: 2.000 mg/L e 3.500 mg/L. Os resultados mostraram que utilizando a água de alimentação de 2.000 mg/L produziu 40 L/h de água potável e operando a uma pressão de 9 bar foi necessário uma potência elétrica de 90 W. Aumentando a pressão de operação para 10 bar, houve um aumento significativo no consumo de energia, todavia, o fluxo do permeado permaneceu inalterado. Com o aumento da incrustação (fouling) na membrana houve aumento no consumo específico de energia. A quantidade de energia requerida para produzir 1 litro de água potável variou de 2 a 8 kWh/m³, dependendo da salinidade da água de alimentação e das condições de operação do sistema. Foi verificado que a melhor pressão de operação para dessalinizar água salobra de poço está numa escala de 6 a 7 bar (RICHARDS, 2003).

As pesquisas de dessalinização com fontes de energia renovável continuam crescendo, o intuito é ter um sistema de baixo custo, onde o custo da energia renovável seja competitivo em relação a energia elétrica convencional.

2.3.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO NO BRASIL

A dessalinização no Brasil teve início há cerca de 15 anos no sertão nordestino, como alternativa para abastecer a população, através da dessalinização de água salobra via osmose inversa.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), mais precisamente o Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) vem desenvolvendo pesquisas na área de dessalinização desde 1996 numa parceria entre a UFCG e a Secretaria de Recursos Hídricos (SRH) do Ministério do Meio Ambiente (MMA).

O LABDES participou do Programa “Água Boa” em 1998, no qual projetou-se e instalou-se mais de 600 sistemas de dessalinização OI em diferentes estados do Nordeste para produção de água de boa qualidade a partir de águas subterrâneas, visando o fornecimento de água potável para a população de municípios e pequenas comunidades a um custo médio de R\$ 0,40/m³. Estes vilarejos são conectados a rede de energia elétrica que alimenta a bomba de alta pressão bem como as bombas auxiliares dos sistemas de dessalinização OI. Esses sistemas necessitam de manutenção preventiva para ter um tempo de vida útil longo com um custo baixo; mas alguns desses sistemas hoje não funcionam por falta dessa manutenção, no entanto muitos estão deteriorados e sem funcionamento. Portanto, foi lançado em Janeiro de 2005 o Programa “Água Doce” com o objetivo de recuperar estes dessalinizadores que se encontram parados e/ou quebrados no semi-árido do Nordeste.

A região Nordeste é caracterizada por grandes estiagens e é considerada como uma das regiões mais pobres do Brasil. Há ainda locais remotos e isolados que além de não possuir água de boa qualidade para o consumo “humano” também não são conectados ao sistema de distribuição de energia elétrica. Isso impede a instalação de sistemas de dessalinização OI para a produção de água potável, a qual beneficiaria significativamente as condições locais de vida. Entretanto, o LABDES vem pesquisando desde 1998 o uso de energia fotovoltaica em sistemas de dessalinização.

Filho (2000) desenvolveu um sistema de dessalinização de pequeno porte com três membranas e outro com uma membrana. Ele utilizou energia elétrica convencional, mas utilizou um varivolt para variar a tensão elétrica. O propósito do uso do varivolt foi simular a variação da tensão em virtude da variação da radiação solar, caso fosse utilizado painéis fotovoltaicos. Nesse sistema, a pressão variou de 3 kgf/cm² a 15 kgf/cm². As soluções de cloreto de sódio estudadas tinham concentração de 4,6 a 10.519 mg/L. Buscou-se com este procedimento determinar a tensão e a corrente elétrica mínima onde o sistema pudesse funcionar (ponto de consumo mínimo de energia pelo motor). Os resultados obtidos mostraram que um sistema de dessalinização pode ter condições de operar com outra fonte de energia e partir para testes experimentais fazendo uso dos painéis fotovoltaicos ao invés do varivolt. Num trabalho realizado por Laborde *et al* (2001), foi analisado e ilustrado quais são os parâmetros num sistema de dessalinização OI de pequeno porte que afetam o consumo energético e devem ser otimizados. Há dois componentes críticos: a bomba de alta pressão, combinada com o motor elétrico, e a configuração do arranjo das membranas. Ambos afetam crucialmente o consumo de energia do sistema.

Oliveira (2002) desenvolveu um sistema de dessalinização de pequeno porte, constituído por uma única membrana de OI, fazendo uso de painéis fotovoltaicos, acumuladores e controlador de carga. Esse sistema operou com solução de cloreto de sódio de concentração de 1.000 mg/L a 4.000 mg/L para pressões de 4,0 a 10,0 kgf/cm². A capacidade de produção de água permeada foi de 200 L/h. Considerando o dia de 6 h de insolação, pode-se obter 1.200 L/h de água potável. Para a maior pressão (10,0 kgf/cm²) e a menor concentração de sais (1000 mg/L) o sistema apresentou o menor consumo de energia (1,5 kWh/m³).

Para fortalecer a pesquisa na área de dessalinização e energia fotovoltaica, propomos um sistema de maior capacidade de produção que o realizado por Oliveira (2002), com diferenças, como: um sistema com duas membranas (capacidade nominal de 500 L/h de água permeada), a substituição de acumuladores de carga por um circuito eletrônico.

A implantação de sistemas de dessalinização deste tipo beneficiaria a população com uma melhor qualidade de vida, além da possibilidade de utilizar a energia obtida de fontes renováveis para outros fins além da dessalinização.

CAPÍTULO III

3 EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da descrição dos materiais e equipamentos utilizados na parte experimental deste trabalho, bem como o procedimento metodológico utilizado.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande, e concentrou-se em estudar o desempenho de um dessalinizador via osmose inversa fazendo uso de painéis solares fotovoltaicos com a utilização de um circuito eletrônico cuja uma das funções é a substituição de acumuladores (baterias).

3.1 SISTEMA DE OSMOSE INVERSA

O sistema experimental ilustrado na Figura 3.1 é constituído de um sistema de dessalinização via osmose inversa acoplado a um sistema de geração de energia elétrica.

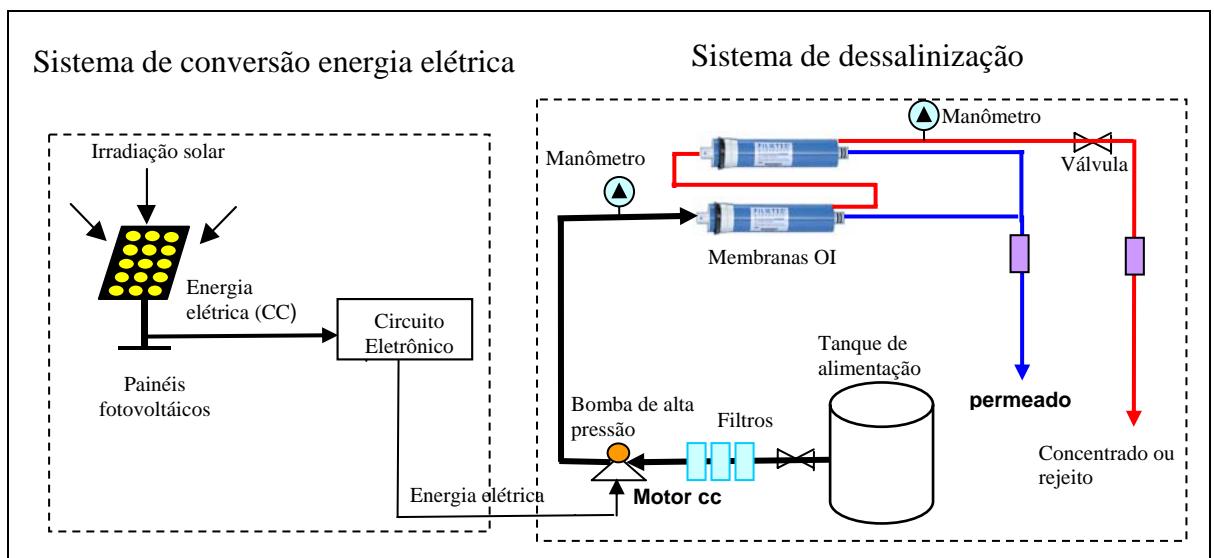


Figura 3.1: Sistema de dessalinização via osmose inversa

3.2 SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO VIA OSMOSE INVERSA

O sistema de dessalinização é constituído por dois elementos de membranas de osmose inversa do tipo BW30LE-4040 (composto de poliamida), da *Filmtec*, cujas características específicas encontram-se na Tabela 3.1.

As membranas são inseridas em tubos de alta pressão ou permeadores (pressão máxima de operação 600 psi = 42 kgf/cm² e temperatura máxima 49°C. Um motor-bomba de alta pressão de 1 HP, 90 V DC / 9,3 A / 746 W / 1750 rpm da *Pacific Scientific*, alimenta as membranas a partir de um tanque de alimentação de capacidade volumétrica de 200 litros. Dois rotâmetros analógicos (1 a 18 LPM) da *Purotecn*, manômetros analógicos da *WIKA*, um tanque de capacidade volumétrica de 200 litros para receber o concentrado e o permeado durante o processo, tubos e conexões de PVC, válvula de retenção colocada na saída do concentrado e mangueiras plásticas complementam o sistema hidráulico.

Tabela 3.1: Especificações da membrana de osmose inversa (Apêndice I)

Material	Compósito de poliamida
Tipo	BW30LE-4040
Configuração	Enrolado em espiral
Pressão máxima aplicada	42,18 kgf / cm ²
Vazão máxima de alimentação	3,6 m ³ / h
Vazão nominal do permeado	9,1 m ³ / d
Temperatura máxima de operação	45°C
pH	2,0 – 11,0
Área nominal da membrana	7,6 m ² (82 ft ²)
Tempo de vida	5 anos

No sistema em série (Figura 3.2) o objetivo é obter água permeada com baixa salinidade e uma maior recuperação. Portanto, a partir da segunda etapa a água bruta é a própria água permeada obtida na etapa anterior.

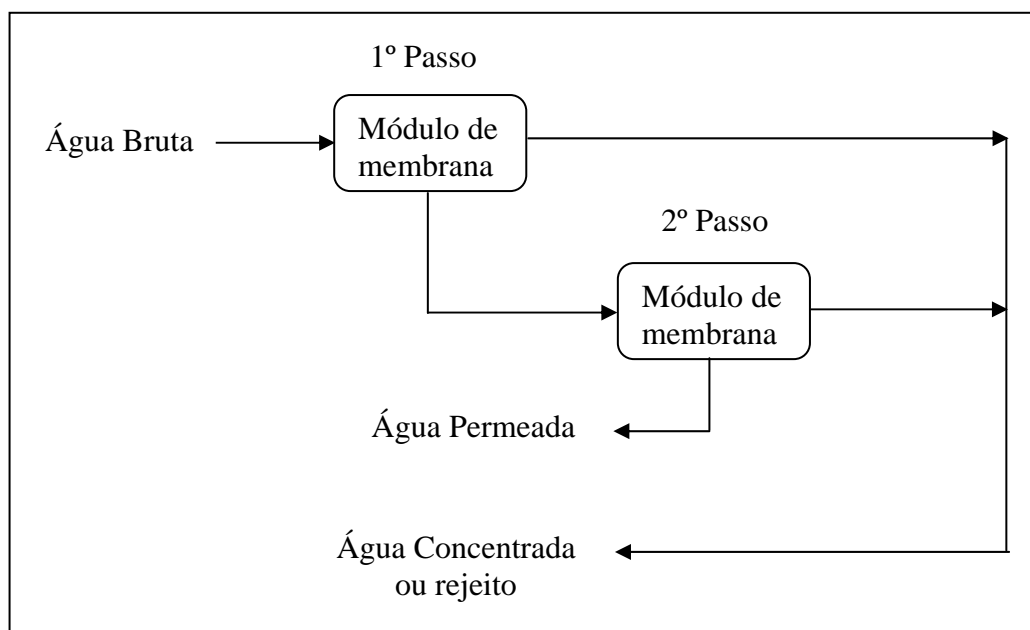


Figura 3.2: Sistema de dessalinização com dois passos

O projeto e a montagem do sistema foram desenvolvidos para esta pesquisa (Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6).



Figura 3.3: Vista frontal do sistema de dessalinização



Figura 3.4: Vista lateral do sistema de dessalinização

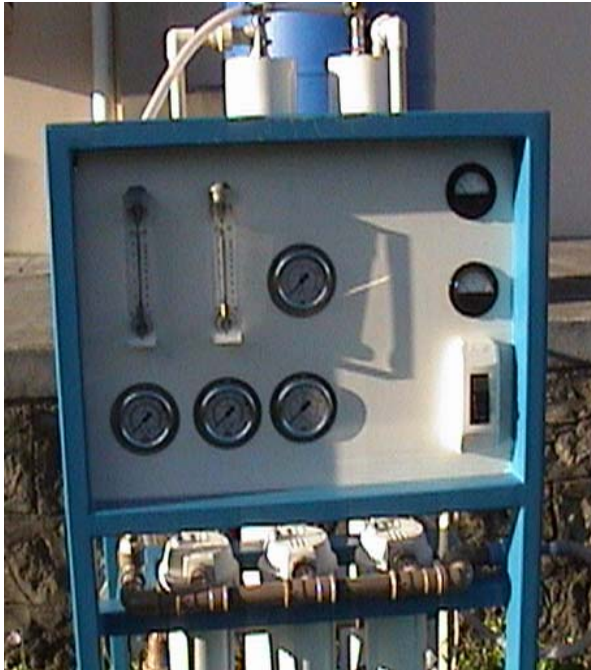


Figura 3.5: Vista frontal do quadro de comando



Figura 3.6: Vista das membranas de osmose inversa

3.3 SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica utilizada para o funcionamento da motor-bomba é proveniente do sistema de geração de energia, o qual é constituído de painéis fotovoltaicos, do sistema de controle (circuito eletrônico) e do sistema de medição (Data Acquisition / Switch, Agilent 34979A).

3.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Para o funcionamento do sistema de dessalinização utilizando a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos (modelo KC110-1 da *Kyocera Corporation* – Tabela 3.2 e Figura 3.7), foram necessários 14 painéis fotovoltaicos na seguinte configuração: 2 conjuntos de 7 painéis ligados em série são conectados em paralelo (Figura 3.8). A Figura 3.9 apresenta a curva de potência máxima de um painel fotovoltaico.

Tabela 3.2: Especificações do painel fotovoltaico (Apêndice 2)

Potência nominal máxima de saída	110 W
Tensão nominal com circuito aberto	21,1 V
Tensão nominal máxima de saída	16,5 V
Corrente nominal máxima com curto circuito	7,25 A
Corrente nominal máxima de saída	6,67 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Área de célula	100 cm ²

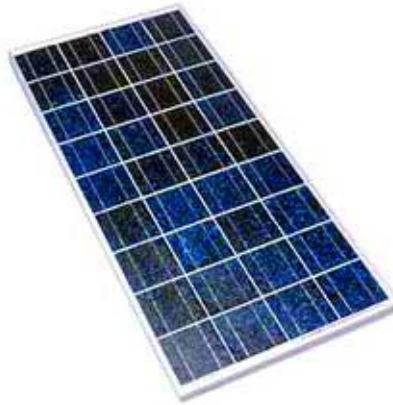


Figura 3.7: Painel fotovoltaico

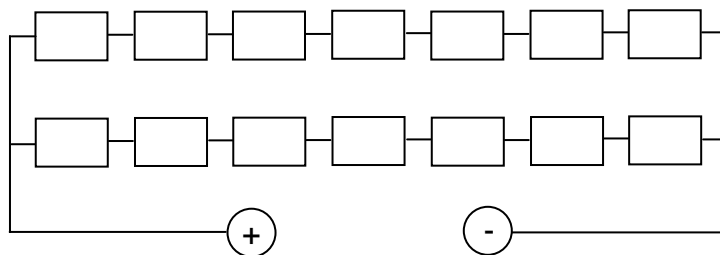


Figura 3.8: Arranjo dos painéis fotovoltaicos

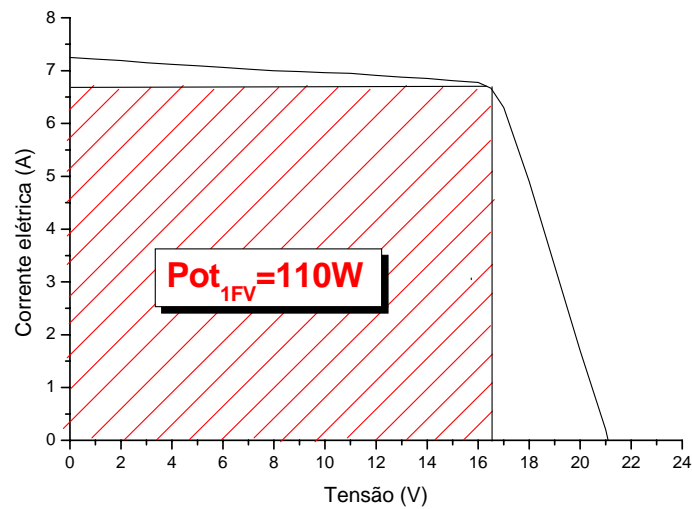


Figura 3.9: Curva I x V

3.3.2 Sistema de medição (Aquisição de dados)

Os primeiros métodos de registro de medidas resumem-se a simples observação do processo, das medidas apresentadas pelos instrumentos de medição e na anotação dos valores numéricos em papel. Este é um método que implica especial atenção do experimentador na leitura e registro das medidas, sendo, portanto um método cansativo e impreciso principalmente nos casos de experimentos longos com várias grandezas sob análise.

Seguindo a tendência determinada pelo desenvolvimento dos computadores, foram sendo desenvolvidos sistemas de aquisição de dados capazes de se adequar aos equipamentos de medição. Assim, sistemas completos de aquisição e armazenamento de dados computadorizados passaram a fazer parte dos recursos dos laboratórios, auxiliando nas atividades de pesquisa.

Em decorrência do grande desenvolvimento verificado no campo da microeletrônica, os recursos de aquisição e de processamento dos dados foram sendo agregados em equipamentos dedicados. Placas de aquisição integradas apresentam sistemas de condicionamento de sinais, amostragem, conversão e armazenamento, e até unidades de processamento digital de sinais.

Uma vez que a tomada de dados é uma das etapas que requer mais atenção em um ciclo de pesquisa, pode-se automatizar o sistema de aquisição sem comprometer a

precisão, reduzindo os erros gerados pela transcrição de dados, eliminando as variações induzidas pelo operador nos processos de coleta de dados e aumentando a taxa de leitura de dados.

Nos equipamentos que se deseja monitorar, ou controlar, são instalados sensores que transformam uma determinada grandeza física em sinais elétricos. Os sinais elétricos produzidos variam de acordo com os parâmetros físicos que estão sendo monitorados, e devem ser condicionados para fornecer sinais apropriados à placa de aquisição de dados. Os acessórios de condicionamento de sinais amplificam, isolam, filtram e excitam sinais para que estes sejam apropriados às placas de aquisição. Uma vez condicionados e trabalhados na forma desejada, os sinais podem ser lidos em computadores, com placas específicas instaladas, e armazenados em diferentes formas, como arquivos de texto.

Foi utilizado o Data Acquisition / Switch (Agilent 34979A) para aquisição dos dados experimentais através de sensores, no qual os dados são armazenados no computador através do programa Agilent BenchLink Data Logger (Figura 3.10). Os dados obtidos fazem parte do sistema de energia e do sistema de dessalinização. Os dados de entrada no sistema de aquisição de dados são obtidos por: um sensor de pressão (obtenção da pressão de saída do concentrado), dois sensores de vazão (obtenção das vazões do permeado e do concentrado), voltímetro e amperímetro (medição da tensão e da corrente elétrica do motor-bomba). Os instrumentos de medição foram conectados ao sistema de aquisição de dados (Data Acquisition) e este ao computador para armazenagem dos resultados.

A taxa de aquisição utilizada pelo equipamento é programável pelo usuário e varia de alguns milissegundos a segundos, minutos ou até horas. O equipamento utilizado na aquisição dos dados apresenta 20 canais, dos quais foram utilizados 6 canais para as leituras de pressão, vazão do permeado, vazão do concentrado, corrente elétrica e tensão. Os dados são armazenados no computador e transferidos para o software Excel, onde foram construídos os gráficos para análise.



Figura 3.10: Sistema de armazenamento de dados.

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O sistema de dessalinização via osmose inversa usando painéis fotovoltaicos com circuito eletrônico, no qual substitui a utilização de acumulador de carga, foi testado com três águas de alimentação de concentrações diferentes, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Tipos de águas analisadas

TIPO DE ÁGUA	CONCENTRAÇÃO	PRESSÃO DE AJUSTE	* VÁLVULA DE RETENÇÃO
Solução de cloreto de sódio (NaCl)	2.500 mg/L	8,0 kgf/cm ²	NÃO
Água de poço	3.800 mg/L	6,0 kgf/cm ²	NÃO
Solução de cloreto de sódio (NaCl) (*)	1.000 mg/L	5,5 kgf/cm ²	SIM

(*) A válvula de retenção foi acoplada na corrente do concentrado

O processo de dessalinização acoplado ao sistema de energia foi efetuado de forma contínua para um dado volume de água salobra (Figura 3.1). Durante o processo foram tomadas amostras na saída das correntes do concentrado e do permeado. Em função do volume tratado, as bateladas levaram aproximadamente de 2 a 6 horas.

A capacidade de produção do permeado e concentrado foram obtidos por meio de rotâmetros, de sensores e de hidrômetros analógicos para o permeado e concentrado. Estes valores de fluxo permitem determinar a recuperação do sistema de acordo com a Equação 2.10. A pressão de saída do concentrado foi obtida com o auxílio de

manômetro e sensor de pressão. Foi colocada na saída do concentrado uma válvula de retenção. Os valores dessas variáveis de medidas foram armazenados no computador através dos sensores elétricos.

Os valores obtidos para as pressões foram provenientes de sinais elétricos. Esses sinais foram convertidos para kgf/cm^2 através de um fator de conversão, o qual foi obtido a partir dos valores das pressões do manômetro analógico do concentrado. Os valores obtidos para as vazões provenientes de sensores elétricos, foram convertidos para m^3/h através de um fator de conversão, o qual foi obtido a partir dos valores mostrados nos rotâmetros instalado no dessalinizador. Da mesma forma, o data acquisition apresentou valores da corrente elétrica durante o processo, no qual foi oriundo do amperímetro conectado no sistema de painéis fotovoltaicos.

Para determinar a viabilidade do uso da energia fotovoltaica para o sistema de dessalinização a cada intervalo de 10 a 50 segundos foram tomadas variáveis de medidas relativos à corrente elétrica, tensão, pressão do sistema, vazão do permeado e vazão do concentrado. Com esses dados, podemos calcular a potência elétrica (Watt), o consumo de energia por metro cúbica produzido de água potável (kWh/m^3) e a recuperação do sistema (%) a partir das Equações 2.23, 2.22 e 2.10, respectivamente.

Após o término das bateladas, as membranas passaram por um processo de lavagem durante 5 minutos, com água deionizada, com o objetivo de expulsar toda a solução remanescente, evitando, assim, a precipitação dos sais na superfície da membrana e possível proliferação de microorganismos.

3.5 PROCESSO DE LIMPEZA

Para proteger e prolongar a vida útil da membrana foram realizadas limpezas químicas. A limpeza foi feita com uma solução de ácido cítrico ($0,27\text{g/L}$), de $\text{pH} = 3,0$. Durante os primeiros cinco minutos, a solução de ácido cítrico foi descartada durante a limpeza. Em seguida, o elemento de membrana ficou embebido na solução durante 2 horas. Descartou-se novamente a solução, e durante um intervalo de tempo de 2 horas lavou-se o elemento de membrana com recirculação constante da solução. Após a lavagem com a solução de ácido cítrico foi efetuado um enxágüe com água deionizada, com o objetivo de retirar a solução ácida do elemento de membrana.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

Neste capítulo são avaliados e discutidos os dados experimentais obtidos com o sistema de dessalinização via osmose inversa, fazendo uso de painéis solares fotovoltaicos com a utilização de um circuito eletrônico cuja uma das funções é a substituição de acumuladores (baterias).

Os principais parâmetros estudados foram:

- Tensão, corrente e potência elétrica.
- Vazão do permeado, do concentrado e da alimentação.
- Recuperação.
- Consumo de energia.

4.1 Sistema de controle - Circuito eletrônico

O circuito eletrônico desenvolvido tem como objetivo permitir a alimentação do motor-bomba diretamente a partir de células fotovoltaicas, sem a utilização de baterias, garantindo o funcionamento do sistema de dessalinização com uma considerável redução no custo do sistema.

O circuito promove a interface entre as células fotovoltaicas e o motor-bomba, realizando as funções de proteção, partida suave e limitação da tensão de alimentação do motor.

Para o seu desenvolvimento foram estudados aspectos funcionais das células fotovoltaicas no que se refere a geração de tensão contínua observando-se que a potência gerada sofre grandes variações de acordo com a intensidade luminosa que incide sobre as células fotovoltaicas.

O circuito eletrônico é composto por quatro estágios que trabalham em cascata afim de permitir o pleno funcionamento do sistema (Figura 4.1).

O primeiro estágio trata-se de circuito responsável pela partida suave do motor, o qual faz a tensão de alimentação do motor durante a partida evoluir em rampa até atingir no máximo a tensão nominal, evitando-se dessa forma picos de corrente. Para este circuito usou-se a topologia de circuitos RC série. Nos testes realizados com o sistema obteve-se um ótimo desempenho da partida motor.

O segundo estágio é responsável pelo controle de nível de tensão no motor. Nesta parte do projeto foram utilizados diodos zener como limitadores de tensão, os quais foram escolhidos com base nas especificações do motor de forma a limitar a tensão de alimentação em 90 V. Devido à disponibilidade comercial, utilizou-se três diodos zener dispostos em série de forma a atingir a tensão para atender aos propósitos do circuito.

O terceiro estágio do projeto consta do circuito de potência, responsável por garantir a corrente de funcionamento do motor tendo como referência a tensão de controle do segundo estágio. Para esta etapa utilizou-se transistores de potencia NPN ligados em coletor comum com resistores de baixo valor no emissor afim de se evitar efeito cascata nos mesmos. Para a especificação dos transistores, novamente usou-se dados técnicos do motor, além de dados técnicos das placas fotovoltaicas do sistema.

O quarto estágio do circuito eletrônico trata da proteção do sistema. Para isso projetou-se um circuito de corte eletrônico baseado no corte e saturação de transistores de junção bipolar que limita a corrente máxima de operação em 5% a mais do valor nominal da corrente de alimentação do motor, protegendo o motor contra sobrecorrentes e consequentemente danos no sistema motor-bomba.

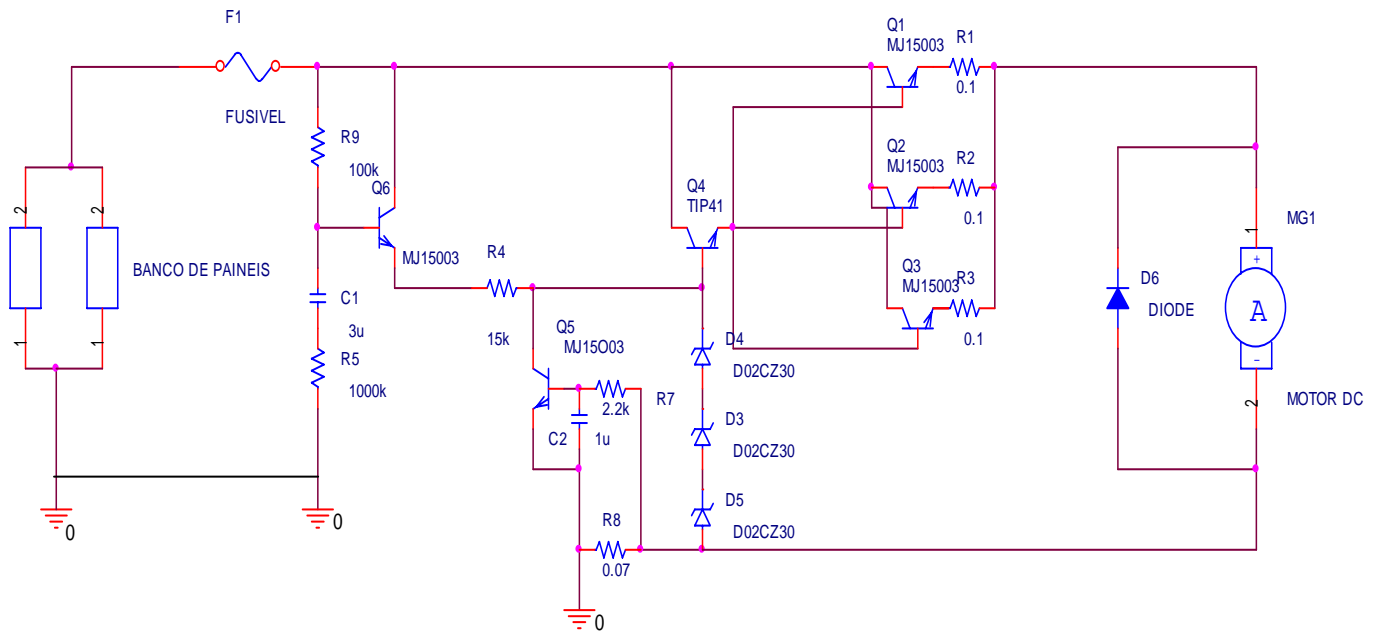


Figura 4.1: Circuito eletrônico

Legenda:

F1- fusível

Ci – capacitor (C1 = capacitor de 3 μ f; C2 = 1 μ f)

Ri – resistor (R1, R2 e R3 = resistores de 0,1 Ω ; R4 = 15k Ω ; R5 = 100 k Ω ; R7= 2.2 k Ω ; R8 = 0,07 k Ω ; R9 = 100k Ω)

Qi – transistor (Q1, Q2 e Q3 = referência comercial MJ15003)

Di – diodo zener (D3, D4 e D5 = referência comercial D02CZ30)

4.2 Aquisições de dados

Conforme descrito no Capítulo III a aquisição de dados foi obtido através de um Data Aquisition, o qual gerou em tempo real uma janela de informações contendo os valores dos seguintes parâmetros: variação da pressão durante o processo, produtividade em termos de vazões de permeado e concentrado, corrente e tensão elétrica, conforme mostra a Figura 4.2.

É importante relatar que a diferença entre a pressão de alimentação e a pressão de saída do sistema de membranas foi de 1,0 kgf/cm². Sendo assim, o monitoramento da variação de pressão foi tomado na saída do concentrado.

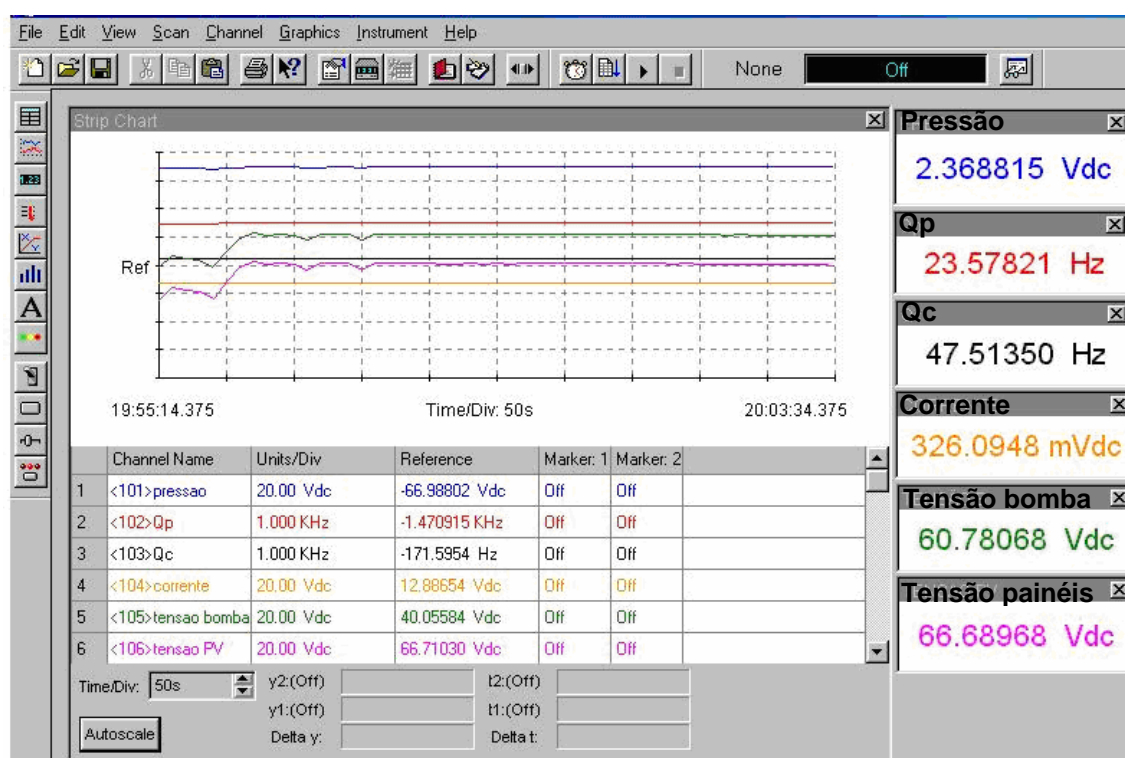


Figura 4.2: Janela do software Agilent BenchLink (Data Acquisition).

4.3 – Variação da tensão em função tempo

Considerando que o sistema não possui acumuladores de carga, a tensão obtida através dos painéis com carga apresentou uma variação em função do tempo, conforme mostra a Figura 4.3. Essa variação se deve a presença de nuvens durante as medições.

O efeito dessa variação de tensão pode afetar o dessalinizador, mas o circuito eletrônico desenvolvido, além de limitar a tensão máxima do motor-bomba (90 V), protege o mesmo contra danificações.

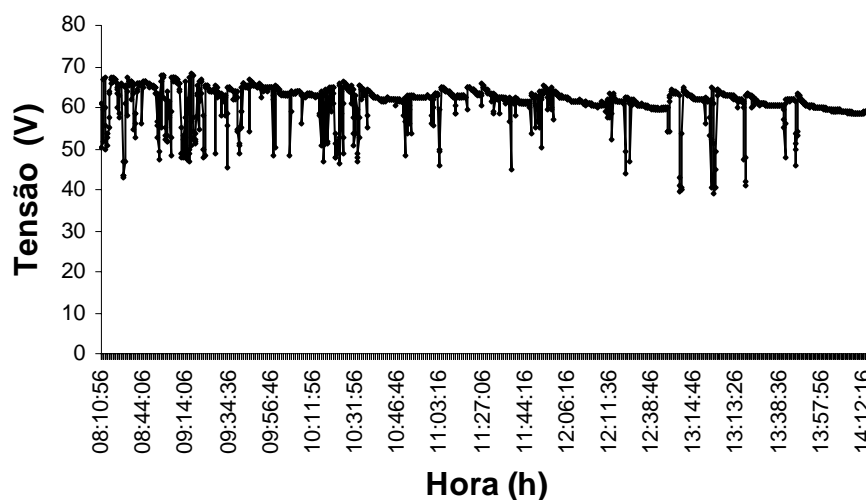


Figura 4.3: Variação da tensão em função do tempo

4.4 Tensão, corrente e potência elétrica

As Figuras 4.4 a 4.12 apresentam o comportamento da pressão do sistema em função da tensão, corrente e potência elétrica. Observa-se nas Figuras 4.4 a 4.9 que com a variação da tensão, corrente e potência elétrica há variação linear na pressão de operação do sistema, devido à variação da irradiação solar. Como o sistema não possui acumulador de carga, a pressão não se mantém constante. Nas Figuras 4.4, 4.6 e 4.8 para solução de cloreto de sódio de 2.500 mg/L e nas Figuras 4.5, 4.7 e 4.9 para água de poço de 3.800 mg/L a pressão máxima foi de 8,2 kgf/cm². Verifica-se que para as maiores pressões, têm-se maiores tensões, correntes e potências. Para a solução de NaCl de 2500 mg/L, para a pressão máxima de 8,2 kgf/cm², a tensão máxima foi de 73V, corrente máxima de 6,5 A e potência máxima de 430 W. Para a água de poço de 3.800 mg/L, para a pressão máxima de 8,2 kgf/cm², a tensão máxima foi de 52 V, corrente máxima de 6,8 A e potência máxima de 354 W. Para a solução de 3.800 mg/L ter a mesma tensão da solução de cloreto de sódio de 2.500 mg/L é necessário uma pressão em torno de 13 kgf/cm². Isso significa que as condições meteorológicas e a concentração da água de alimentação influenciam diretamente na pressão de operação do sistema.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 para solução de cloreto de sódio de 1.000 mg/L, mostram o comportamento da pressão do sistema com e sem o uso da válvula de retenção em função da tensão, corrente elétrica, e potência, respectivamente. De acordo

com o comportamento dos dados obtidos, nota-se que para uma dada pressão de $5,0 \text{ kgf/cm}^2$ o sistema operando com a válvula de retenção obtêm uma tensão aproximadamente de 50 V, corrente de 4,6 A, resultando numa potência de 230 W. Para o sistema sem o uso da válvula de retenção, a tensão é de 63V, a corrente de 4,6 A, resultando numa potência de 290 W. Essa diferença entre esses resultados com e sem o uso da válvula, mesmo a concentração da solução de NaCl sendo a mesma, pode ser devido a irradiação durante os dias no qual o experimento foi realizado ser diferente.

Para os três tipos de águas estudadas a pressão inicial de operação foi ajustada num determinado valor, mas ela não se mantém fixa, varia de acordo com a irradiação solar. Com a utilização da válvula de retenção quando a irradiação solar diminui, o sistema de dessalinização mantém-se pressurizado.

Para todos os casos estudados, a potência elétrica requerida pelo motor-bomba foi de apenas 50% da sua capacidade nominal, já que o motor-bomba tem uma potência nominal de 746 W. Isso provoca diminuição de produção do sistema. Essa diferença pode ser justificada em função da presença de nuvens na atmosfera durante os experimentos.

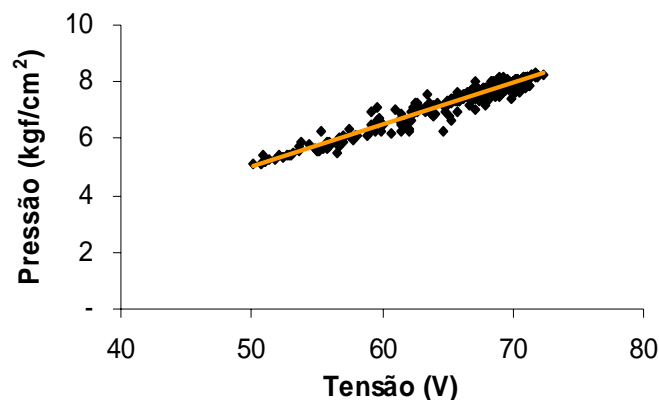


Figura 4.4: Pressão versus a tensão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L

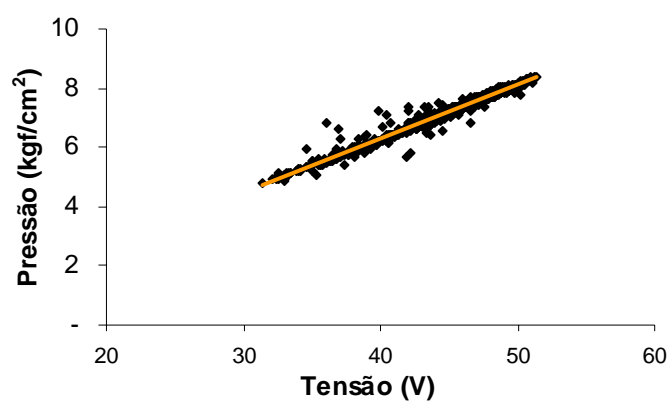


Figura 4.5: Pressão versus a tensão do sistema para água de poço com concentração de 3.800 mg/L

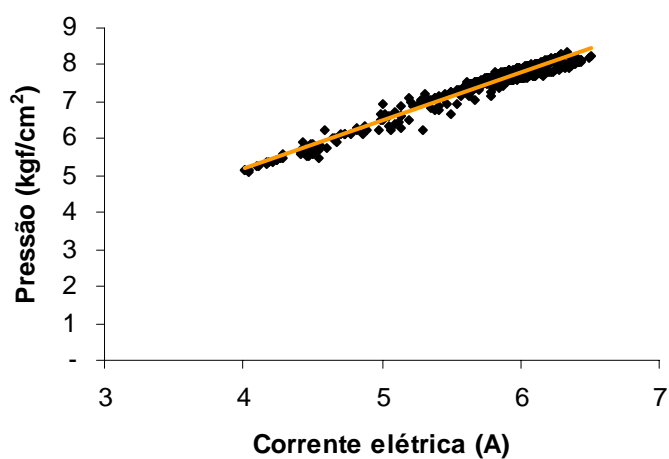


Figura 4.6: Pressão versus a corrente elétrica para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L

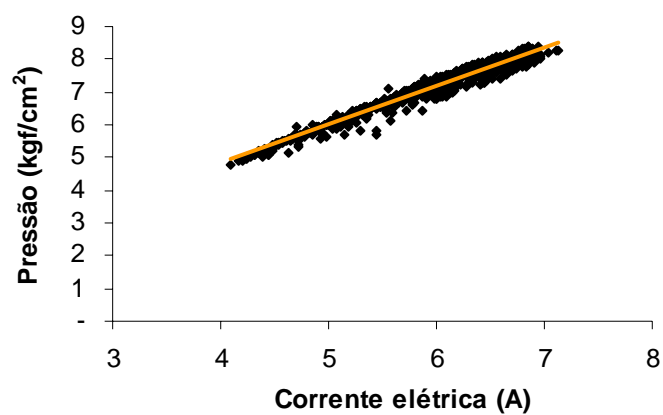


Figura 4.7: Pressão versus a corrente elétrica para água de poço com concentração de 3.800 mg/L

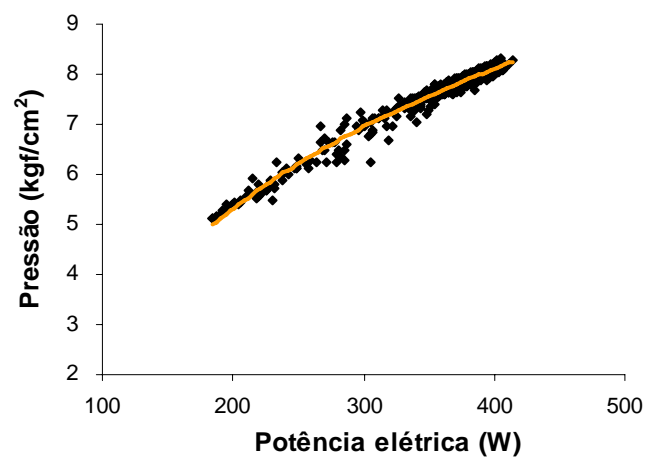


Figura 4.8: Pressão versus a potência elétrica para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L

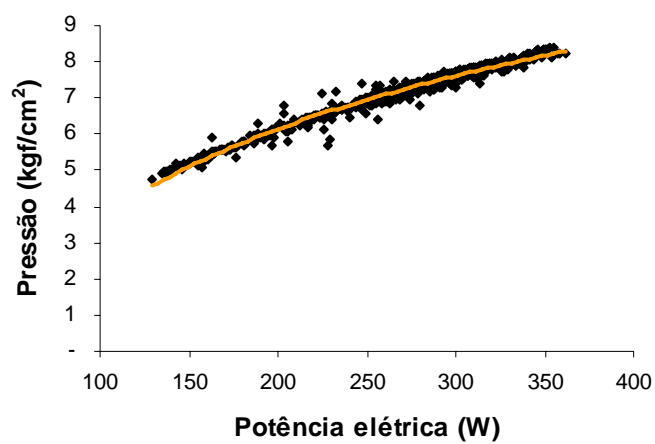


Figura 4.9: Pressão versus a potência elétrica para água de poço com concentração de 3.800 mg/L

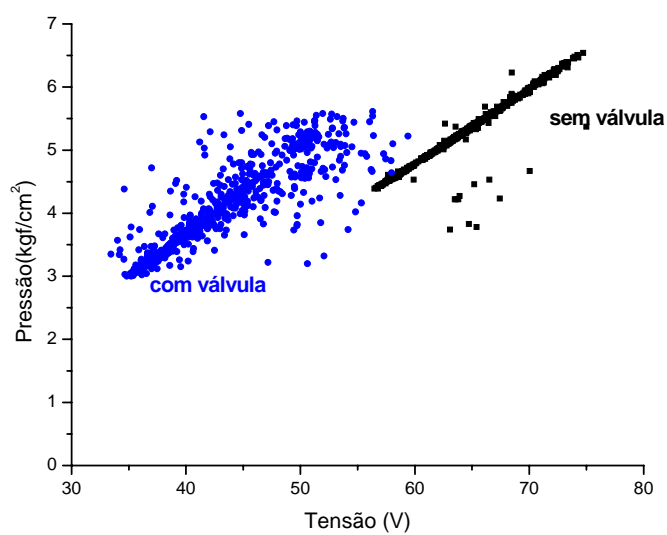


Figura 4.10: Pressão versus a tensão para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L

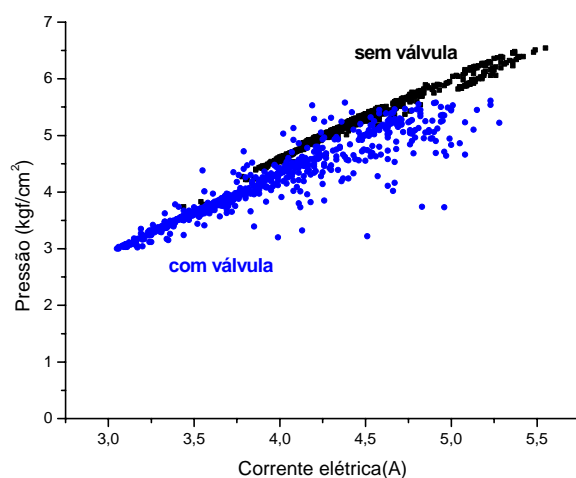


Figura 4.11: Pressão versus a corrente elétrica para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L

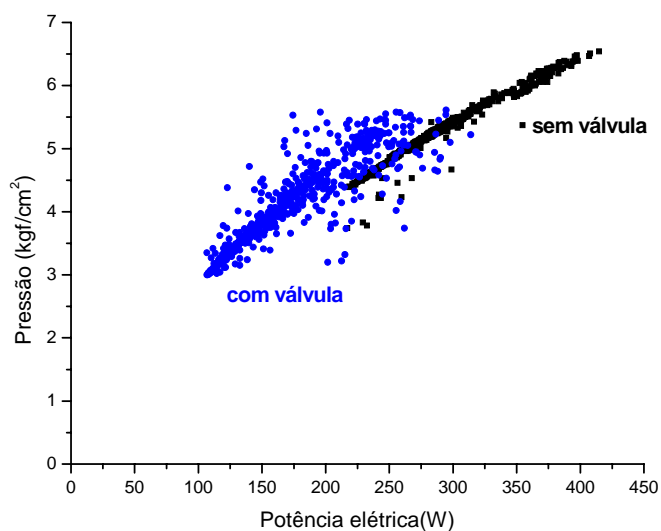


Figura 4.12: Pressão versus a potência elétrica para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L

4.5 - Vazão do permeado, do concentrado e da alimentação

A produção de água permeada de um sistema depende do número de elementos de membranas, tipo de água, gradiente de pressão aplicado, número de painéis e oferta de energia solar.

O ideal era manter a alimentação constante durante o processo de dessalinização como ocorre nos sistemas alimentados por fonte de energia convencional, isso não acontece nesse caso devido à variação da irradiação solar e consequentemente variação da potência elétrica. No entanto, o comportamento das vazões do permeado, concentrado e alimentação apresentados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 são crescente.

Com o aumento da irradiação solar ocorre um aumento na tensão e a partir desta há um aumento na vazão do permeado. Porém, na Figura 4.15, chega-se a um ponto no qual mesmo ocorrendo um aumento de tensão, não há variação da vazão do permeado, pois a válvula de retenção não deixa a pressão subir além da estipulada.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentaram uma vazão máxima de permeado de 0,25 m³/h e 0,24 m³/h para uma pressão de 8,4 kgf/cm², respectivamente.

A Figura 4.15 para uma pressão de 5,0 kgf/cm², o sistema sem a válvula de retenção e com a válvula de retenção produziu aproximadamente 0,20 m³/h, isso significa que não houve variação significativa.

A produção de água permeada obtida nos sistemas foi inferior à capacidade nominal da membrana, que é de 0,5 m³/h, mas mesmo assim o sistema é capaz de fornecer água potável para uma pequena comunidade isolada.

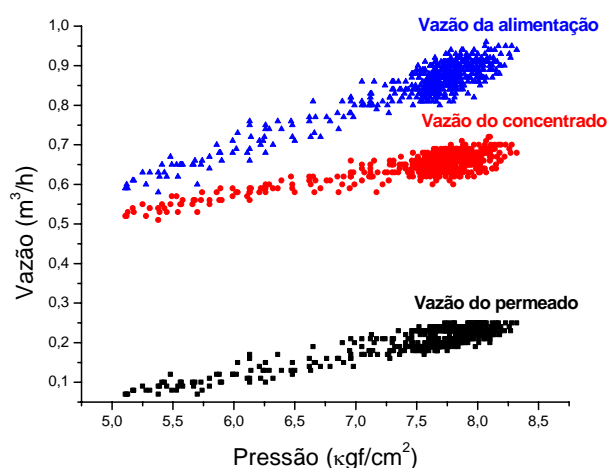


Figura 4.13: Vazão versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L

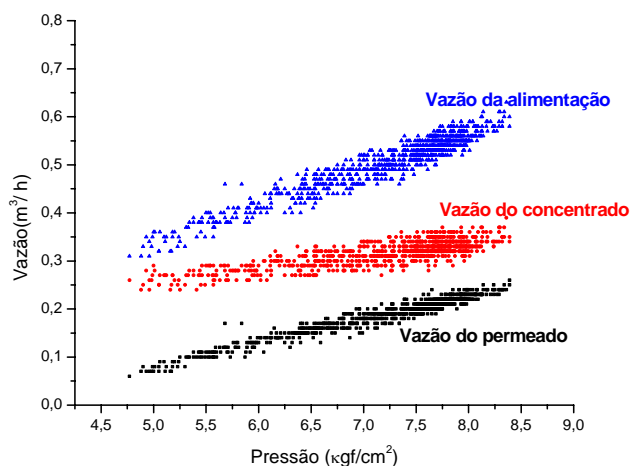


Figura 4.14: Vazão versus a pressão para água de poço com concentração de 3.800 mg/L.

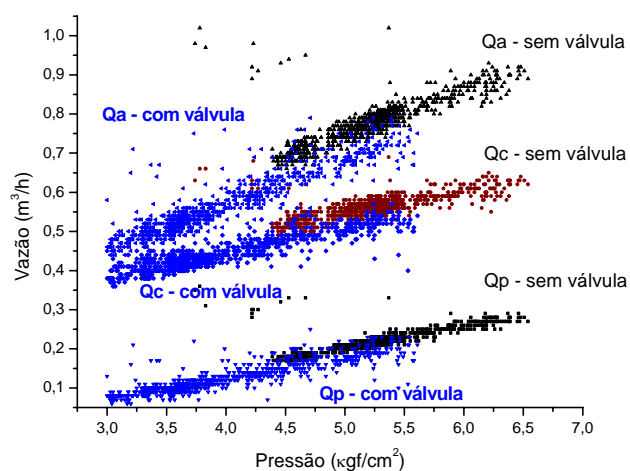


Figura 4.15: Vazão versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 1.000 mg/L

4.6 - Recuperação

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 são apresentadas os perfis da recuperação do sistema em função da pressão de operação.

Observam-se um aumento da recuperação em função da pressão para as Figuras 4.16, 4.17 e 4.18. Isto se deve ao fato de que ao aumentar a pressão, mais água permeia a

área efetiva da membrana. Este comportamento pode ser observado combinando as Equações 2.2 e 2.10; que resulta:

$$r = [K_w A(\Delta P - \Delta \pi)] / Q_a \quad 4.1$$

Sendo A e Q_a constantes e K_w e $\Delta \pi$ aproximadamente constantes durante o processo, a recuperação se apresenta como uma função linear da pressão de alimentação, como no caso da vazão do permeado.

O efeito da recuperação do sistema está relacionado com vários parâmetros como: concentração de sais dissolvidos na água de alimentação, a qual dimensiona o valor da pressão osmótica que deve ser vencida durante o processo de dessalinização, a área efetiva de transferência de massa, o tipo de membrana utilizada, como também da oferta de radiação solar. A recuperação depende do tipo do pré-tratamento aplicado à água bruta.

Observa-se que a Figuras 4.16 tem uma recuperação em torno de 27 % para a pressão de 8,4 kgf/cm². A Figura 4.17 tem uma recuperação em torno de 40 % para a mesma pressão da Figura 4.16. A diferença na recuperação é devido a concentração da solução de NaCl ser diferente e a irradiação solar nos dias dos experimentos não ser a mesma.

Na Figura 4.18 para a pressão de 5,5 kgf/cm², para o sistema sem válvula de retenção a recuperação é em torno de 26 % e para o sistema com a válvula de retenção a recuperação é em torno de 36 %. A recuperação está diretamente relacionada com a vazão do permeado e com a vazão do concentrado (Equação 2.12). Como a vazão do permeado, para essa mesma pressão, foi a mesma, o que influenciou na recuperação foi a vazão da alimentação, pois esta é função da irradiação solar.

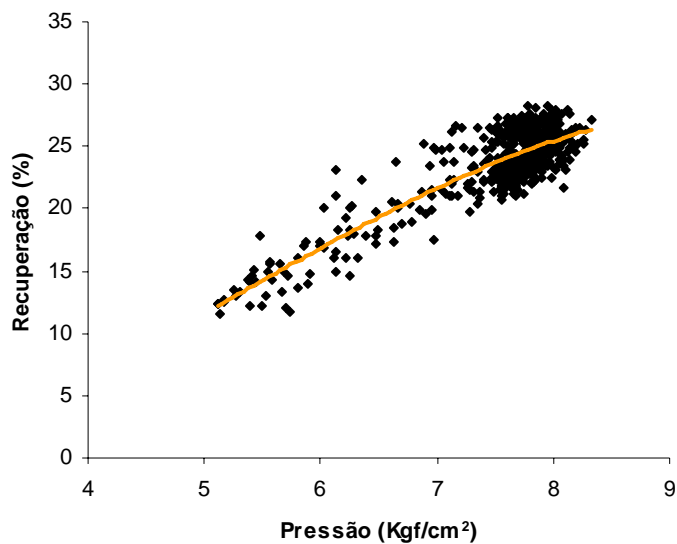


Figura 4.16: Recuperação do sistema versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L

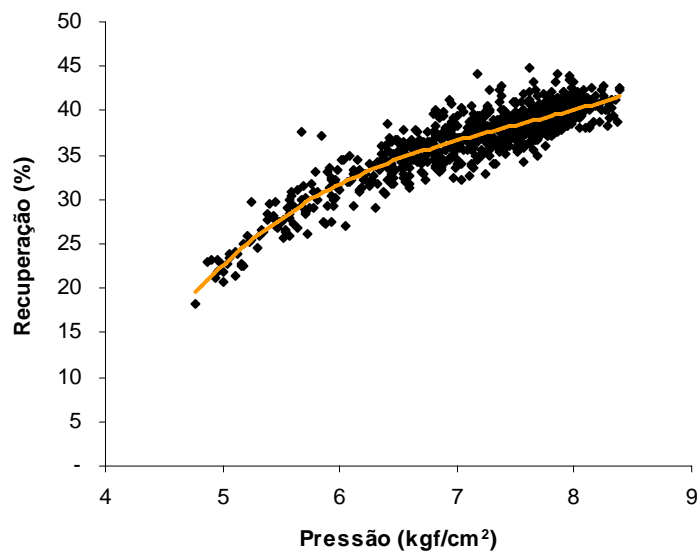


Figura 4.17: Recuperação do sistema versus a pressão para água de poço com concentração de 3.800 mg/L

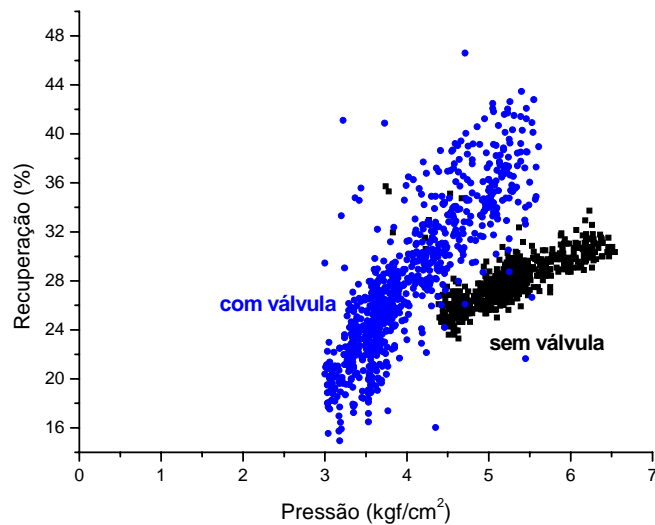


Figura 4.18: Recuperação do sistema versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 1000 mg/L

4.7 - Consumo de energia

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 apresentam o consumo de energia em função da pressão obtida. Observa-se que a variação do consumo de energia/m³ de água produzida diminui à medida que a pressão aumenta, pois com o aumento de pressão a vazão do permeado cresce. Esse fato está de acordo com a Equação 2.22. O interessante é que o comportamento do consumo de energia com a pressão tem a forma de uma parábola, isso significa que a faixa de pressão/produção mais econômica se dá no mínimo da parábola.

Para a Figura 4.19 e 4.20, para a pressão de 8,0 kgf/cm², o menor consumo de energia foi em torno de 1,7 kWh/m³ e 1,4 kWh/m³, respectivamente.

A Figura 4.21 mostra que o menor consumo de energia foi para a faixa de pressão de 4,5 kgf/cm² e 5,5 kgf/cm², que corresponde a 1,3 kWh/m³. Para a produção de água do sistema e a faixa de concentrações de águas estudadas, estes consumos de energias obtidos está de acordo com literaturas sobre sistemas de dessalinização utilizando painéis fotovoltaicos (SCHAFER et al, 2007).

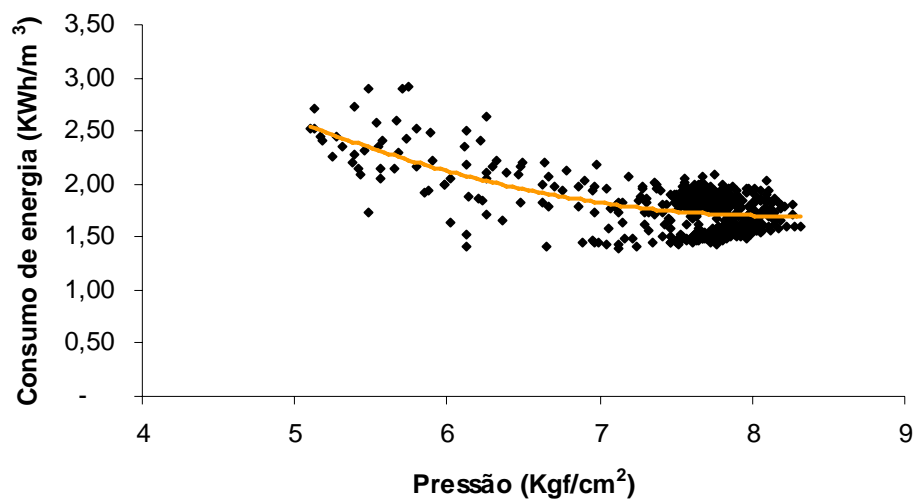


Figura 4.19: Consumo de energia versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 2.500 mg/L

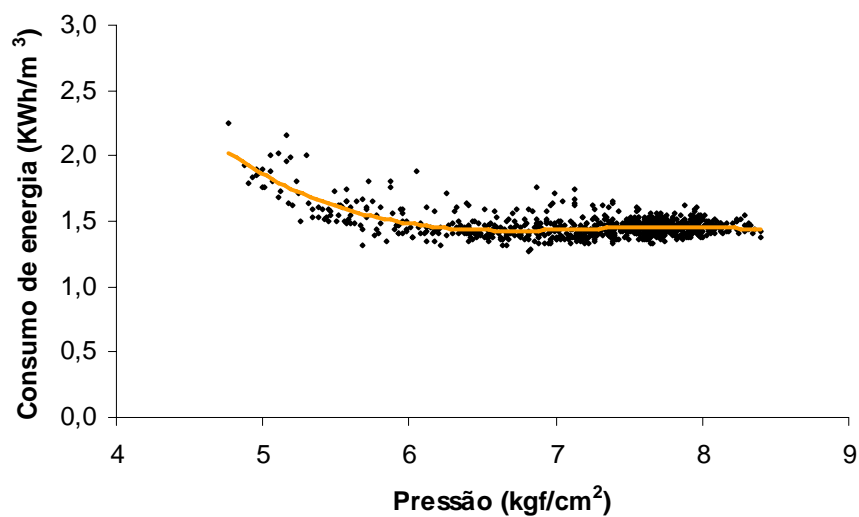


Figura 4.20: Consumo de energia versus a pressão para água de poço com concentração de 3.800 mg/L

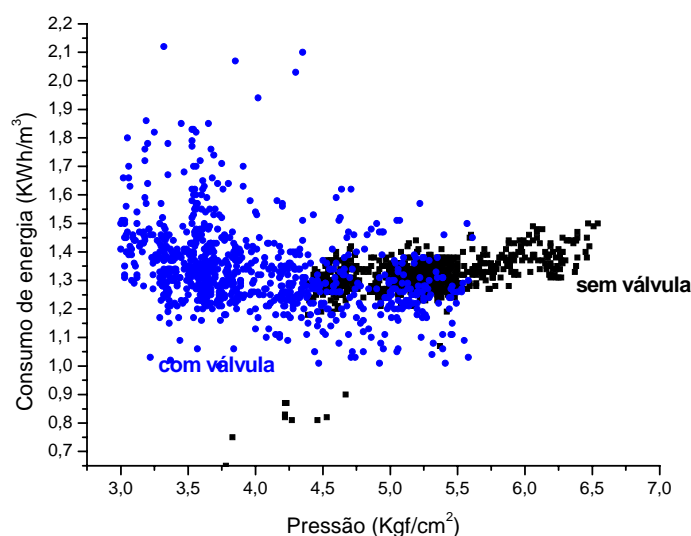


Figura 4.21: Consumo de energia versus a pressão para solução de NaCl com concentração de 1.000mg/L.

4.8 BALANÇO DE CUSTO DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO ACIONADO POR FONTE RENOVÁVEL

Neste tópico é proposto uma estimativa ou análise de custo - benefício para a instalação de um sistema de dessalinização via osmose inversa acionado por energia fotovoltaica, para a instalação no campo em comunidade remota.

O sistema de dessalinização via painel fotovoltaico depende de muitos fatores, incluindo a infra-estrutura do sistema, a salinidade da água de alimentação e a quantidade, o tamanho da planta, o custo de energia, o tipo de processo utilizado, a operação e manutenção.

O sistema poderá operar para uma água de concentração de sais dissolvidos entre 1.000 mg/L a 5.000 mg/L.

O balanço de custo foi baseado ao de AHMAD e SCHMID (2002). O período de 20 anos foi definido por ser a expectativa de vida útil dos painéis fotovoltaicos.

a. Construção do abrigo (CT1)

DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO (R\$)
Abriço do dessalinizador (3 m x 5m)	5.500,00
Cerca de proteção	4.500,00
Reservatório incluindo a base (alimentação, permeado e concentrado)	9.950,00
Abriço para quadro de comando da bomba e caixa de medição do poço	880,00
Material elétrico (ligação de energia do abriço para quadro de comando)	450,00
Total 1 (CT1)	27.080,00

b) Perfuração e captação (CT2)

DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO (R\$)
Perfuração do poço	5.600,00
Captação	5.800,00
Total 2 (CT2)	11.400,00

c. Sistema de dessalinização (CT3)

DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO (R\$)
Dessalinizador com membranas (2)	10.000,00
Total 3 (CT3)	10.000,00

d. Sistema de energia (CT4)

DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO (R\$)
Painéis fotovoltaicos (14 – 110V - Kyocera)	30.800,00
Acessórios de controle de carga e potência	2.000,00
Acessórios de instalação (estrutura metálica, fiação, diodos, quadro de comando - disjuntores, contactores)	1.500,00
Circuito eletrônico	100,00
Total 4 (CT4)	34.400,00

e. Operação e manutenção do sistema - O&M (CT5)

DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO (R\$)
Operação e manutenção (reagentes químicos, despesas com operador, limpeza de membranas, acessórios) 2% do custo inicial (CT3 +CT4)	(2% x R\$44.400,00) = R\$888,00
Troca de membranas	6.600,00
Total 5 (CT5)	7.488,00

Para fazer uma estimativa de custos para o sistema de dessalinização utilizamos os dados das tabelas acima. A instalação de um sistema de dessalinização global envolve a perfuração de um poço tubular, a construção de um abrigo para colocar o dessalinizador, o sistema de painéis fotovoltaicos, o sistema eletrônico e/ou banco de baterias.

Para o sistema em estudo, os dados comuns são:

- A produção média de água dessalinizada é de 0,5 m³/h (500L/h).
- O sistema funcionará 26 dias/mês, ou seja, 312 dias/ano
- Em média o sistema operará 6 horas por dia. Portanto, a produção diária de água dessalinizada será de: 6 h x 500L/h = 3.000 L/h = 3 m³/h

Sistema 1: Considerando que a localidade **não tem o poço, não tem o abrigo.**

$$\text{Custo Total (CT)} = \text{CT1} + \text{CT2} + \text{CT3} + \text{CT4} + \text{CT5}$$

$$\text{CT} = 27.080,00 + 11.400,00 + 10.000,00 + 34.400 + 7.488 = \text{R\$ } 90.360,00$$

$$\text{Custo diário} = \frac{\text{R\$}90.360,00}{20 \text{ anos}} \times \frac{1 \text{ ano}}{312 \text{ d}} = \text{R\$ } 14,48/\text{dia}$$

$$\text{Custo da produção de água} = \frac{\text{R\$ } 14,48/\text{d}}{3 \text{ m}^3/\text{d}} = \text{R\$ } 4,82/\text{m}^3$$

Sistema 2: Considerando que a localidade **já tem o poço.**

$$\text{Custo Total (CT)} = \text{CT1} + \text{CT3} + \text{CT4} + \text{CT5}$$

$$CT = 27.080,00 + 10.000,00 + 34.400 + 7.488 = \text{R\$ } 78.968,00$$

$$\text{Custo diário} = \frac{\text{R\$ } 78.968,00}{20 \text{ anos} \times 312 \text{ d}} = \text{R\$ } 12,65/\text{dia}$$

$$\text{Custo da produção de água} = \frac{\text{R\$ } 12,65/\text{d}}{3 \text{ m}^3/\text{d}} = \text{R\$ } 4,20/\text{m}^3$$

Sistema 3: Considerando que a localidade **tem o poço e o abrigo.**

$$\text{Custo Total (CT)} = CT3 + CT4 + CT5$$

$$CT = 10.000,00 + 34.400 + 7.488 = \text{R\$ } 51.888,00$$

$$\text{Custo diário} = \frac{\text{R\$ } 51.888}{20 \text{ anos} \times 312 \text{ d}} = \text{R\$ } 8,31/\text{dia}$$

$$\text{Custo da produção de água} = \frac{\text{R\$ } 8,31/\text{d}}{3 \text{ m}^3/\text{d}} = \text{R\$ } 2,77/\text{m}^3$$

Sistema 4: Considerando que a localidade **tem o poço, tem o abrigo, e será acrescentado no sistema de energia um banco de baterias.** Logo, o sistema não possui o circuito eletrônico.

Para estimar o custo da água dessalinizada deve-se levar em consideração os seguintes custos:

$$\text{Sistema de dessalinização (CT3)} = \text{R\$ } 10.000,00$$

$$\text{Sistema de energia (CT4), com exceção do circuito eletrônico} = \text{R\$ } 34.300,00$$

Operação & Manutenção (CT5) acrescentado de:

$$\text{Baterias (7 x 150 Ah)} = \text{R\$ } 4.200,00 \times 6 \text{ (troca de baterias)} = \text{R\$ } 25.200,00$$

As baterias têm uma vida útil de 3 anos.

$$\text{Troca do controlador de carga (vida útil 10 anos)} = \text{R\$ } 1.200,00$$

$$\text{Logo, o CT5 será} = \text{R\$ } 7.488,00 + \text{R\$ } 25.200,00 + \text{R\$ } 1.200 = \text{R\$ } 33.888,00$$

$$\text{Custo Total (CT)} = CT3 + CT4 + CT5$$

$$CT = 10.000,00 + 34.300,00 + 33.888,00 = 78.188,00$$

$$\text{Custo diário} = \frac{\text{R\$78188,00} \times 1 \text{ ano}}{20 \text{ anos} \quad 312 \text{ d}} = \text{R\$ 12,53/dia}$$

$$\text{Custo da produção de água} = \frac{\text{R\$ 12,53/d}}{3 \text{ m}^3/\text{d}} = \text{R\$ 4,17/m}^3$$

Com uma produção de 500L/h = 1.500 L/d, dá para abastecer uma pequena comunidade com 300 pessoas, cada uma consumindo 5 L/d de água potável.

Fazendo uma comparação entre os custos obtidos, temos que:

SISTEMAS	DESCRIÇÃO	CUSTO ESTIMADO (R\$) m ³ /d	CUSTO ESTIMADO (R\$) m ³
Sistema 1	Construção do abrigo, perfuração do poço, sistema de dessalinização, sistema de energia, operação e manutenção.	14,48	4,82
Sistema 2	Perfuração do poço, sistema de dessalinização, sistema de energia, operação e manutenção.	12,65	4,20
Sistema 3	Sistema de dessalinização, sistema de energia, operação e manutenção.	8,31	2,77
Sistema 4	Sistema de dessalinização, sistema de energia, operação e manutenção (com baterias e controlador de carga).	12,53	4,17

Observa-se na Tabela acima que o menor custo para produção (m³) de água dessalinizada por dia é obtido quando o sistema é conduzido para uma localidade remota na qual já existe o poço e o abrigo. Logo, para fornecer água potável para essa comunidade é necessário apenas ter o sistema de dessalinização, o sistema de energia solar fotovoltaica, no qual o circuito eletrônico faz parte. Verifica-se que o sistema 4, no qual tem um banco de baterias apresenta um custo próximo ao sistema 2 e superior ao sistema 3, no qual tem o circuito eletrônico, com a eliminação do banco de baterias.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

Existem ainda, no mundo, regiões habitadas com problemas de abastecimento de água e ausência ou precariedade do serviço de energia elétrica. No Nordeste do Brasil existem povoados, vilas e até cidades que refletem bem essa realidade. Nestes locais, muitas vezes há disponibilidade de água de rios, do mar ou do subsolo, porém imprópria para o consumo humano.

As tecnologias adotadas no projeto da unidade de dessalinização foram a fotovoltaica (FV) e a osmose inversa (OI). A união dessas duas tecnologias é justificada pela possibilidade de racionalizar a utilização dos recursos naturais locais (água e energia), alcançada através da complementaridade sazonal existente entre a precipitação de chuva e a radiação solar. Felizmente, as piores condições de radiação solar coincidem com a época mais chuvosa.

Visando um sistema de menor complexidade de operação do sistema e de menor custo, uma vez que a aplicação é direcionada para lugares relativamente isolados, foi desenvolvido um sistema de dessalinização com painéis fotovoltaicos que dispensa o uso de sistemas de armazenamento de energia.

A influência da característica variável da tensão produzida pelos painéis fotovoltaicos no acionamento do dessalinizador por OI foi analisado e concluiu-se que se deve controlar o sistema para garantir o funcionamento do dessalinizador. Portanto foi utilizado um circuito eletrônico para proteger o sistema de eventuais danos.

Considerando a forma como o sistema de dessalinização se encontra funcionando conclui-se o seguinte:

- (1) A pressão de operação durante o processo aumentou proporcionalmente com a corrente e tensão elétrica proveniente da energia gerada dos painéis fotovoltaicos para os casos analisados. Para o sistema no qual foi acoplada a válvula de retenção verificou-se que a pressão não ultrapassa o valor de ajuste inicial. A pressão máxima foi de 8,2 kgf/cm².

-
- (2) Para os casos estudados verificou-se que a potência elétrica fornecida ao motor-bomba foi inferior a sua capacidade nominal. Isto é reflexo de alguns fatores, como por exemplo, a irradiação baixa e consequentemente a energia dos painéis é insuficiente para alimentar o motor-bomba (1HP).
 - (3) Em função do comportamento dos dados da corrente e tensão elétrica as vazões de alimentação, do concentrado e permeado não se mantiveram constantes. Isto devido à variação da irradiação solar ao longo do dia.
 - (4) A faixa de recuperação do sistema depende diretamente do potencial e oferta de irradiação solar durante o período que este trabalho foi realizado, como também da concentração da água de alimentação. De acordo com o perfil da recuperação frente à pressão obtida o comportamento procede, mas mostra que a fragilidade do sistema está na não sustentabilidade da corrente e tensão obtida durante o processo de dessalinização. A maior recuperação obtida foi de 40%.
 - (5) Considerando que o sistema de membranas pode produzir em torno de 0,5 m³/h os dados demonstram que a forma como o sistema se encontra operando (produção de água permeada em torno 0,25 m³/h), há uma perda de energia significativa devido o processo da realimentação de água para o sistema de membranas.
 - (6) Observou-se que o circuito eletrônico desenvolvido além de proteger o motor-bomba, fez por onde o mesmo operasse sob uma tensão de partida funcionando sem afetar sua eficiência.
 - (7) No balanço de custo realizado observa-se que o custo do m³ de água dessalinizada é maior para o Sistema 1, quando o sistema vai ser implantado numa localidade remota, na qual não tem o poço, nem tem o abrigo. Neste caso, 1 m³ = R\$ 4,82. O menor custo é obtido para o Sistema 3, quando o sistema é conduzido para localidade que já tem o poço e o abrigo, com a utilização do circuito eletrônico. Nesse caso, o custo do m³ reduz para R\$ 2,77/ m³. Para as localidades remotas é viável a utilização da OI com energia solar fotovoltaica, desde que haja uma contrapartida dos órgãos públicos para a instalação desses sistemas. Para uma comunidade remota, se fosse instalar o sistema com energia elétrica convencional, os gastos com os sistemas de transmissão e distribuição da energia elétrica convencional são muito elevados para essas localidades.

CAPÍTULO VI

6 PERSPECTIVAS

Esta dissertação não teve a pretensão de esgotar as análises sobre unidade de osmose inversa com energia fotovoltaica sem a utilização de acumuladores. Aqui se inicia diversos pontos que merecem ser desenvolvidos. Para isso são apontadas as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Estudar o sistema com o menor número de painéis fotovoltaicos, sem acumuladores, mas com condição de produzir água potável para atender uma determinada comunidade.
- Testar o sistema com diferentes concentrações.
- Otimizar o circuito eletrônico de forma que quando a tensão chegar num determinado valor no qual não haja produção do permeado, automaticamente o sistema pare e quando a tensão aumentar o sistema retorne a produzir.
- Como o sistema é móvel, testa-lo numa localidade de clima quente.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A. **Simulation and analysis of an industrial water desalination plant.** Chemical Engineering and Processing, v. 44, ed 9, 2005, p. 999 -1004.

ABDALLAHA S.; ABU-HILAL, M.; MOHSEN M. S., **Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions.** Desalination, v. 183, 2005, p. 95 -104.

ABDEL-JAWAD, M., AL-SHAMMARI, S. e AL-SULAIMI, J., **Non-conventional treatment of treated municipal wastewater for reverse osmosis.** Desalination, v. 142, 2002, p. 11-18.

ACIOLI, J. DE LIMA – **Fontes de energia** – Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994. p. 92.

AHAMAD, G. E., SCHMID, J. **Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems.** Energy Conversion and Management v. 43, 2002, p. 2641-2649.

ALMEIDA, E. P., **Comparação de dois sistemas de dessalinização via osmose inversa e os efeitos da limpeza química dos elementos de membranas.** 2003. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

AMJAD, Z. **Reverse Osmose: Membrane Technology, Water Chemistry & Industrial Applications.** Van Nostrand Reinhold, 1993.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **“Atlas de Energia Elétrica do Brasil - 2ª Edição**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao. Acesso em: 15 de fevereiro de 2005.

ARORA, M.; MAHESHWARI, R.C.; JAIN, S.K. e GUPTA, A. **Use of membrane technology for potable water production**. *Desalination*, v. 170, ed. 2, 2004, p. 105 - 112.

BELLESIOTIS, V., DELYANNIS, E. **The history of renewable energies for water desalination**. *Desalination*, v. 128, 2000, p. 147-159 .

BENNETT, P. B., **Scale and deposit control for reverse osmosis systems**, Membrane technology conference proceedings, American water works association, New Orleans, LA, 1996, p. 681 - 693.

BEZERRA, A. M., **Aplicações térmicas da energia solar**. João Pessoa. Editora Universitária / UFPB, 2001.

BLASQUES, L. C. M., **Estudo da viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos para geração de eletricidade**. 2005. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém.

BODDEKER, R. R., **Inorganic Membranes Syntesis, Characteristics and applications**. Van Nostrand, New York, 1995, Chap. 1 and 2.

BOUGUECH, S., HAMROUNI, B.; DHAHBI, M., **Operating analysis of a direct energy coupled desalination family prototype**. *Desalination*, v. 168, 2004, p. 95 - 100.

BRANDT, D.C., LEITNER, G. F e LEITNER, W. E., **Reverse osmosis membrane states of the art**, In Zahid Amjad (ed), *Reverse osmosis – Membrane Tecnology, Water Chemistry and Industrial Application*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.

BYRNE, W. **Reverse osmosis – A practical guide for industrial users**. 2ª edição. Editora Tall Oaks publishing 2002.

CALLISTER, W. D. J., **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma introdução**. Editora LTC. 5ª edição, 2002, p. 417 – 420.

CARTA, J. A. ; GONZÁLEZ, J.; SUBIELA, V., **Operational analysis of na innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands**. Solar Energy, vol. 75, ed 2, 2003, p. 153 – 168.

CERAGIOLLI, P. C., **Manual de Energia Solar Fotovoltaica**. RF Comércio de sistemas Ltda. São José dos Campos, São Paulo, 1997.

CHEN, S. S.; TAYLOR, J. S., MORRIS. C.D. e HOFMAN, J. A.M.H., **Flat sheet testing for pesticide removal by varying RO; NF membranes**, Desalination, 1997, p. 843 - 848.

CHILDS, W. D., DABIRIS, A. E., AL-HINAI, A. e ABDULLAH, H. A., **VARI-RO Solar-powered desalting technology**. Desalination, v. 125, 1999, p.155 - 166.

EL-DESSOUKY, H. T. e ETTOUNEY, H. M. **Fundamentals of Salt Water Desalination**. Ed. Elsevier/2002 - Capítulo 1 , p. 11-12.

ENERGIA FOTOVOLTAICA – **Manual sobre tecnologia, projeto e instalação**. Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2005.

FAURE, G., **Principles and applications of inorganic geochemistry: a comprehensive textbook for geology students**. Editora Prentice Hall, p. 443, 1991, New Jersey.

FILHO, A. B. L., **Estudo e desenvolvimento de um sistema de dessalinização via osmose inversa para pequenas comunidades, fazendo uso de painéis fotovoltaicos**, 2000. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

FRANÇA K.B., LABORDE, H.M. NEFF, H., **Design and performance of small scale solar powered water desalination systems, utilizing reverse osmosis**. Journal of Solar Energy Engineering, v. 122, 2000, p. 170 - 181.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C., MAUS, L., ANDERSEN, L. B. ; **Princípio das Operações Unitárias**. 2ª edição. Editora Guanabara Dois S.A Rio de Janeiro, 1982.

GARCIA, F. H., **Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaico**. 2004. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GLEGG, **Elemento de membrana em espiral**, 2000. Disponível em: <http://www.glegg.com>. Acesso em: 20 de janeiro de 2000.

GREEN, M. A., **Photovoltaic principles**. Physica elsevier, v.14, 2002, p.11-17.

HABERT, A.C., BORGES, C. P. e NOBREGA, R., **Processos de separação com membranas**, Escola piloto em engenharia química, COPPE/UFRJ – Programa de engenharia química., Editora e-paper, Rio de Janeiro, 2006.

HAMMOND, C. R. , **The elements, Handbook of Chemistry and Physics**, Ed. D. R. Lide, CRC Press, Ann Arbor, USA, 1992.

HAMAD, A.; ABDUL-KARIM, M. **Desalination using ambient air: simulation and energy optimization**. Desalination, v. 175, ed. 3, 2005, p. 247 - 257.

HIMMELBLAU, D. M., **Engenharia Química: Princípios e Cálculos**. 4ª edição. Editora Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1984.

HYDRANAUTICS. RO System Design Software. Version 64(c), 1998.

IDA - Wangnick Consulting, **Worldwide Desalting Plants Inventory**, Report. No. 16, 2000.

IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía. **Manuales de energy renovables**, vol. 6, energia solar fotovoltaica. Edição especila Cinco Dias. Gráfica Internacional, S. A., Espanha, 1995.

ISHIMURA, N., **Solar photovoltaic desalination of brackish water in remote areas by electrodualysis**. Desalination, v. 98, 1994, p. 485-493.

JOYCE A., LOUREIRO, D., RODRIGUES, C. e CASTRO, S., **Small reverse osmosis units PVsystems for water purification in rural places**. Desalination, v. 137, 2001, p. 39-44.

LEÃO, C. L.; PEREIRA, A. L.; TIBA, C. e BARBOSA, E. M. S. **Fontes não convencionais de energia**. Centro avançado de estudos do semi-árido nordestino – CESANE – UFPE- 2001.

LONSDALE, H. K., **The growth of membrane technology**. Journal of Membrane Science, v. 10, 1982, p. 81 - 81.

Lyonnaise des Eaux; **Water Research Comission of South Africa**. McGraw-Hill. Washington, DC, USA, 1996.

KAHDIM, A. S., JASSIM, A. A., A., ISMAIL, S. **Effect of different operation pressures for various membranes on the performance of RO plants**. Desalination, v. 155, ed. 3, 2003, p. 287 - 291.

KALOGIROU, S. A. **Seawater desalination using renewable energy sources.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 31 , ed. 3, 2005, p. 242 - 281.

KIM, S., HOEK, E. M.V. **Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes,** Desalination, v. 186, ed. 1-3, 2005, p. 111 - 28.

KORONEOS, C., DOMPROS, A., ROUMAS, G., **Renewable energy driven desalination systems modeling.** Journal of Cleaner , 2005.

MADAENI, S. S., MOHAMAMDI, T. e MOGHADAM, M. K., **Chemical cleaning of reverse osmosis membranes.** Desalination, v. 134, 2001, p. 77 - 82.

MCVEIGH, J. C. **Sun Power – an introduction to the applications of solar energy.** Pergamon International Library, England, 1979.

MALLEVIALLE, J. ODENDAAL, P. E. e WIESNER, M. R., **Water Treatment Membrane Processes.** American Water Works Association Research Foundation; 1996

MONTEIRO, C., **Sistemas Fotovoltaicos.** 1996 - Disponível em <<http://power.inescn.pt/claudio/PV.html>. Acesso em 02 de Julho de 2004.

PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programs>. Acesso em: 03 de Março de 2006.

MORENO, F. e PINILLA, A. **Preliminary experimental study of a small reverse osmosis wind-powered desalination plant.** Desalination, v. 171, ed. 3, 2004, p. 257 - 265

MOHSEN, M. S. e JABER, J. O., **A photovoltaic-powered system for water desalination.** Desalination, v. 138, 2001, p. 129 - 136.

NETO, F. R., **Modelagem e controle de um sistema de dessalinização por osmose inversa utilizando redes de petri**. 2005. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

NISHIMURA, M.; KOYAMA, K.; NAKAGOWA, T., **Reverse osmosis**, In Osada, Membrane Science and Tecnology, Marcel Dekker, Inc. New York, 1992.

OLIVEIRA, A. R., **Desempenho de um sistema de dessalinização via osmose inversa, em escala piloto, alimentado por painéis fotovoltaicos**. 2002. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB.

OZAKI, H. e LI, H., **Rejection of organic compounds by ultra-low pressure reverse osmosis membrane**. Water Research, v. 36, 2002, p. 123 - 130.

PALZ, W., **Energia solar e fontes alternativas**; São Paulo: Hemus, 1981.

PERRY, R. H. & GRENN, D. W. , **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 5ª edição, Ed. Mc Graw Hill, United States of America, 1986.

PESTANA, I. N., LATORRE, F. J. G., ESPINOZA, C. A. & GOTOR, A. G., **Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind energy**. Desalination, v. 160, 2004, p 293 - 299.

PLANETA ORGÂNICO. **O uso da água e o cenário atual no Brasil**. Disponível em: <<http://www.planetaorganico.com.br/aguabr.htm>>. Acesso em: 02 de Agosto de 2005.

PROGRAMA LUZ PARA TODOS - **Programa Nacional de Universalização do acesso e uso da energia elétrica – Manual de operacionalização** – Ministério de Minas e energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 20 de janeiro de 2006.

PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica)

Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programs>. Acesso em: 03 de Março de 2006.

PRIEB, C. W. M. , **Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RALUY, R. G., SERRA, L., UCHE, J.; **Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies**. Desalination, v. 183, 2005, p. 81 - 93.

RICHARDS, B. S.; SCHÄFER, A. I., **Photovoltaic-powered desalination system for remote Australian communities**. Renewable Energy, v. 28, 2003, p. 2013 - 2022.

RODRIGUEZ, L. G., **Seawater desalination driven by renewable energies: a review**. Desalination, v. 143, 2002, p. 103 - 113.

RÜTHER, R. e KLEISS, G., **Advantages of Thin Film Solar Modules in Façade, Sound Barrier and Roof-Mounted PV Systems**, Anais da Conferência EuroSun'96, Freiburg, Alemanha, 1996, p. 862.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES, **Photovoltaic Design Center**, “Stand-Alone Photovoltaic Systems – A Handbook of Recommended Design Practices”, 1991.

SCOTT, K., **Handbook of Industrial Membranes**, Elsevier advanced technology, 1º ed., 1997.

SCHWINGE, J.; NEAL, P. R.; WILEY, D. E., FLETCHER, D. F., FAUL, A. G. **Spiral wound module and spacers Review and analysis**. Journal of Membrane Science, v. 242, ed. 1 – 2, 2004, p. 129 - 153

SCHAFER, A. I., BROECKMANN, A., RICHARDS, B. S. **Renewable Energy Powered Membrane Technology. Development and characterization of a**

photovoltaic hybrid membrane system. Enviromental Science & Technology, 2007, vol. 41, 998-1003.

SEVERINO, T. P; MESSIAS, A. S.; COSTA, M. R. N. **Água: fonte de vida** . Recife: UNICAP, 2005. Editora Printer , 240 p , p 79.

SHAH, A.; MEIER, J., TSCHARNER, R.; WYRSCH, N., **Photovoltaic Power Generation**, Plasma Phisics & Controlled Fusion, v. 37, 1992, p. 1837.

SILVA, F. T., **Concentração de suco de laranja (Citrus sinensis) por osmose inversa**, Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 1995.

SILVA, E. P.; CAVALIERO, C. K. N. **Perspectivas para as fontes renováveis de energia no Brasil**. Jornal da Unicamp ARTIGO. Disponível em: http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/fevereiro2003/ju204pg02.html. Acesso em: Janeiro de 2005.

SILVEIRA, M. C., **Avaliação de um sistema híbrido para dessalinização de águas salinas pelo processo de osmose inversa**. Campina Grande, 1999. Dissertação (Mestrado em engenharia química), UFPB.

SUDAK, R. G., **Reverse osmosis in Porter**, M. C. (ed), Handbook of Industrial membrane technology, Noyel publications, New Jersey, 1990.

SULEIMANI, A. Z.M NAIR, R. V.; **Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote of the Sulfanate of Oman**. Applied Energy, v. 65, 2000, p. 367-380.

TAYLOR, J. P. e JACOBS, E. P., **Reverse osmosis and nanofiltration**, In Joel Mallevialle et al (eds.), Water treatment membrane process, Mc Graw-Hill, New York, 1996.

TRAUBE, M. **Physiologie und Wisseischlaftliche medicin**, in: Reischert and Dubois-Reynolds, eds.; Archiv fuz anatomie, Leipzig, 1867.

TSIOURTIS, N. X., **Desalination and the environment**. Desalination, v. 141, 2001, p. 223-236.

TZEN, E.; MORRIS, R. **Renewable energy sources for desalination** . Solar Energy, v. 75, ed. 5, 2003, p. 375-379.

APÊNDICE I

BOLETIM TÉCNICO DA MEMBRANA

FILMTEC Membranes

FILMTEC Fibreglassed Elements for Light Industrial Systems

Features

FILMTEC™ brackish water reverse osmosis membrane elements provide consistent, outstanding system performance in light industrial applications.

- FILMTEC BW30LE-4040 delivers highest performance at lowest pressure resulting in less energy usage and lower costs.
- FILMTEC BW30-4040 is the industry standard for reliable operation and production of the highest quality water.
- FILMTEC BW30-2540 elements are designed for systems smaller than 1 gpm (0.2 m³/h) offering a hard shell exterior for extra strength.

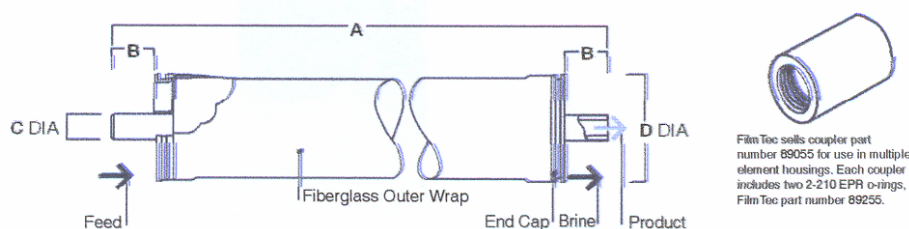
Elements with a hard shell exterior are recommended for systems with multiple-element housings containing three or more membranes, as they are designed to withstand higher pressure drops.

Product Specifications

Product	Part Number	Active Area ft² (m²)	Applied Pressure psig (bar)	Permeate Flow Rate gpd (m³/d)	Stabilized Salt Rejection (%)
BW30LE-4040	80604	82 (7.6)	150 (10.3)	2,300 (8.7)	99.0
BW30-4040	80783	82 (7.6)	225 (15.5)	2,400 (9.1)	99.5
BW30-2540	80766	28 (2.6)	225 (15.5)	850 (3.2)	99.5

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 2,000 ppm NaCl, pressure specified above, 77°F (25°C) and 15% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.
3. For the purpose of improvement, specifications may be updated periodically.
4. BW30LE-4040 was previously named BW30HP-4040.

Figure 1



Product	Dimensions – Inches (mm)			
	A	B	C	D
BW30LE-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
BW30-4040	40.0 (1,016)	1.05 (26.7)	0.75 (19)	3.9 (99)
BW30-2540	40.0 (1,016)	1.19 (30.2)	0.75 (19)	2.4 (61)

1. Refer to FilmTec Design Guidelines for multiple-element systems.

2. BW30-2540 elements fit nominal 2.5-inch I.D. pressure vessel. BW30LE-4040 and BW30-4040 elements fit nominal 4-inch I.D. pressure vessel.

1 inch = 25.4 mm

Operating Limits

• Membrane Type	Polyamide Thin-Film Composite
• Maximum Operating Temperature ^a	113°F (45°C)
• Maximum Operating Pressure	600 psi (41 bar)
• Maximum Feed Flow Rate - 4040 elements	16 gpm (3.6 m³/h)
• - 2540 elements	6 gpm (1.4 m³/h)
• Maximum Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
• pH Range, Continuous Operation ^a	2 – 11
• pH Range, Short-Term Cleaning ^b	1 – 12
• Maximum Feed Silt Density Index	SDI 5
• Free Chlorine Tolerance ^c	<0.1 ppm

^a Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).

^b Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.

^c Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, FilmTec recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to technical bulletin 609-22010 for more information.

Important Information

Proper start-up of reverse osmosis water treatment systems is essential to prepare the membranes for operating service and to prevent membrane damage due to overfeeding or hydraulic shock. Following the proper start-up sequence also helps ensure that system operating parameters conform to design specifications so that system water quality and productivity goals can be achieved.

Before initiating system start-up procedures, membrane pretreatment, loading of the membrane elements, instrument calibration and other system checks should be completed.

Please refer to the application information literature entitled "Start-Up Sequence" (Form No. 609-00298) for more information.

Operation Guidelines

Avoid any abrupt pressure or cross-flow variations on the spiral elements during start-up, shutdown, cleaning or other sequences to prevent possible membrane damage. During start-up, a gradual change from a standstill to operating state is recommended as follows:

- Feed pressure should be increased gradually over a 30-60 second time frame.
- Cross-flow velocity at set operating point should be achieved gradually over 15-20 seconds.
- Permeate obtained from first hour of operation should be discarded.

General Information

- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- If operating limits and guidelines given in this bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void.
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution.
- The customer is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements.
- Maximum pressure drop across an entire pressure vessel (housing) is 50 psi (3.4 bar).
- Avoid static permeate-side backpressure at all times.

APÊNDICE II

ESPECIFICAÇÕES DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Power-Value 110&120



PHOTOCOMM, INC.
THE WIRELESS POWER COMPANY

Solar Electric Modules

The Power-Value PV-110 and PV-120 are state-of-the-art photovoltaic modules ideal for use in all types of solar power systems. Using the proven Cz single crystal solar cell technology, Power-Value (PV) modules deliver sufficient voltage for general battery charging, and direct drive applications.

Features

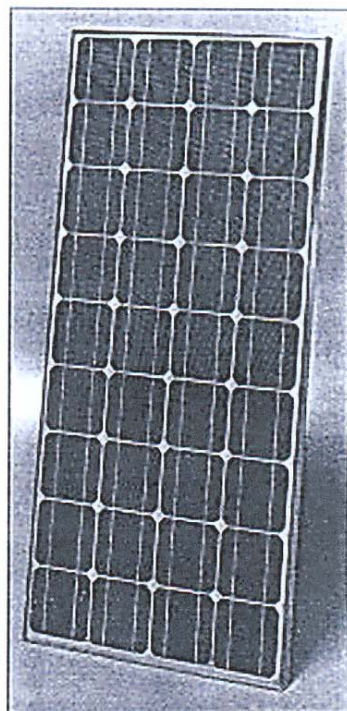
- High power modular building block configuration
- Over 6.5 Amps of charging in full sunlight
- Spacious junction box for ease of wiring
- Industry standard mounting hole patterns
- 10-year warranty
- UL Listed

Construction

- 36 series connected single crystal Cz silicon cells
- Rugged, corrosion resistant, anodized aluminum frame
- Weather resistant, conduit-ready junction box
- Integral bypass diodes

Applications

- Microwave/Radio repeater stations
- Cathodic protection systems
- Electrification of remote villages
- Rural or remote village water supplies
- Pumping systems for irrigation and livestock watering
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Desalination systems
- Medical facilities and schools in rural areas
- Remote or rural home lighting systems
- General battery charging



PV-110/PV-120

Typical Electrical Specifications*

	PV-110	PV-120
• Peak power (Pp)	110 Watts	120 Watts
• Open circuit voltage (Voc)	20.7 Volts	21.0 Volts
• Max. power voltage (Vmp)	16.7 Volts	16.9 Volts
• Short circuit current (Isc)	7.5 Amps	7.7 Amps
• Max. power current (Imp)	6.6 Amps	7.1 Amps

Typical Physical Specifications

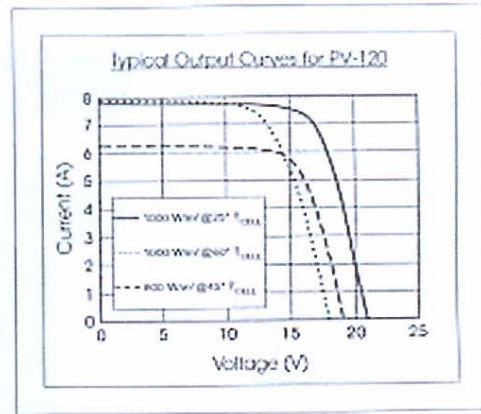
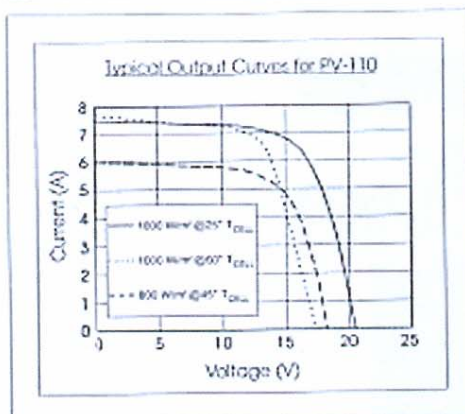
• Weight	26.1 lbs. (11.9 kg)
• Dimensions	58.1 x 26.0 x 1.4 in. (1476 x 660 x 35 mm)

*NOTE: Electrical specifications are under standard test conditions: irradiance of 1kW/m², spectrum of 1.5, at max. and cell temperature of 25°C.

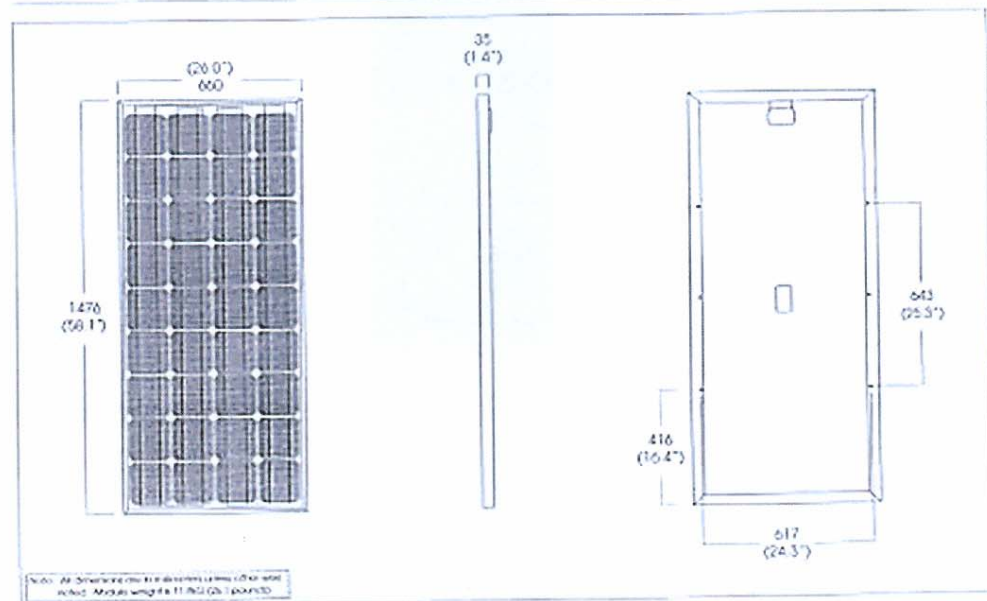
Power-Value 110&120

Technical Specifications

Electrical Characteristics



Physical Characteristics



PHOTOCOMM, INC.
THE WIRELESS POWER COMPANY

Printed on Recycled Paper • Printed in USA

GOLDEN GENESIS COMPANY

7812 East Acorn Dr.
Scottsdale, AZ 85260
Phone (800) 544-6466 (602) 951-6329
E-Mail: info@goldengenesiscorp.com